



**Tesis Monográfica para optar al Título de  
Ingeniero Eléctrico**

**Título**

**Aprovechamiento de los residuos provenientes de las industrias  
madereras y del almidón extraído de yuca por vía seca, para la  
elaboración de combustible sólido**

**Autores:**

**Br. González Maleaño, Álvaro José  
Br. Rosales Roberto Carlos**

**Tutor:**

**Zúñiga Guillen, Jhader Exequiel**

**Managua, 2016**

## **I. INTRODUCCIÓN**

Actualmente, el mundo se encuentra en un periodo de crisis energética, ya que dentro de algunos años, se espera la disminución de la producción mundial de petróleo. Mientras tanto, la demanda mundial no deja de aumentar empeorando el problema. Sin embargo; existen alternativas que pueden aportar un poco contra la crisis energética, es el caso de la elaboración de briquetas biomásicas que podrían ser útiles para ciertas áreas de la economía que utilizan combustibles sólidos como leña u otros que pueden ser caros y rendir menos.

La Universidad Nacional de Ingeniería y el Instituto Forestal Latinoamericano (INFIL) en su compromiso con el correcto aprovechamiento de los recursos naturales, se encuentran interesados en el manejo y reutilización de los residuos provenientes de la elaboración de muebles de madera fabricados en las instalaciones de la UNI-RUPAP con el propósito de crear un combustible sólido fácilmente aprovechable.

Se analizó la posibilidad de producir briquetas a partir de aserrín prensado con Rumen bovino, potenciado además con un ligero porcentaje de biodiesel para lograr un combustible con un alto poder calorífico, como fuente de energía económica y renovable que ayude a proteger el medio ambiente y contribuya a evitar la deforestación de los bosques, fácilmente adaptable a cualquier fuente de generación de energía y con mayor facilidad de transporte y almacenaje que otros productos sustitutos.

Se determinó las propiedades físico-químicas de las materias primas y del producto, tales como humedad, densidad, porcentaje de cenizas, poder calorífico, dureza. De igual manera se analizó los beneficios de su uso y el costo de producirlo.

## **II. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Elaborar un Combustible Sólido a partir de Aserrín y material ruminal impregnados con biodiesel.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Calcular las propiedades físicas de los materiales a utilizar (Humedad, densidad, ceniza), mediante métodos estándares
- b) Medir el poder calorífico de las materias primas para la elaboración del combustible mediante calorimetría
- c) Cuantificar el poder calorífico del combustible, mediante calorimetría, así como sus propiedades físicas.
- d) Evaluar los costos de producción del combustible sólido.

### III. ANTECEDENTES

La idea de la fabricación de briquetas con residuos de forestales fue iniciada en 1957 en Soria, España con el carácter de ensayo. Se han realizado ensayos sobre combustibles sólidos como alternativas amigables con el medio ambiente, como el elaborado por el Centro de Desarrollo e Investigación en Termofluidos (CEDIT), Lima Perú que demuestra la viabilidad de fabricación de briquetas y evalúa el desempeño de diferentes materiales biomásicos de los cuales la mejor combinación fue de Aserrín con papel.<sup>1</sup>

Se sabe que en otros países latinoamericanos existen empresas que fabrican briquetas de manera industrial, en su mayoría usando residuos de sus propios aserraderos o fábricas de muebles y moldes, como lo son Briquetas Corinay en el Perú o LIPPEL en Brasil.

El Grupo de Investigación en Energías Renovables (GIDER) de la facultad de Ingeniería en la Universidad Nacional del Nordeste, Argentina, elaboró briquetas a partir de aserrín de pino blanco, en el cual, considerando que la materia prima de este producto logrado tiene un contenido de humedad entre 8 a 12 %, obtuvieron una eficiencia energética de 4672,45 Kcal/kg o 19562.6 KJ/Kg como poder calorífico superior.<sup>2</sup>

El briquetamiento de biomasa no es una idea recién concebida; sin embargo, no se logró encontrar registros de trabajos monográficos o de otra índole respecto al tema dentro de la UNI.

---

<sup>1</sup> [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/rev\\_cedit/2007\\_V02/pdf/a04v2.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/rev_cedit/2007_V02/pdf/a04v2.pdf)

<sup>2</sup> <http://www.asades.org.ar/modulos/averma/trabajos/2012/2012-t006-a004.pdf>

#### **IV. JUSTIFICACIÓN**

El presente estudio planea dar un uso productivo a los residuos biomásicos producidos en el Instituto Forestal Industrial Latinoamericano (INFIL) el cual se encuentra ubicado en el Recinto Pedro Arauz Palacios de la Universidad Nacional de Ingeniería, creando un combustible que contribuya con el cuidado del medio ambiente.

Este producto podría aumentar la eficiencia de los procesos que necesitan combustibles sólidos de pequeñas empresas que ocupan leña u otros combustibles en hornos de secado, calderas de potencia media y superior; ladrilleras, pollerías, panaderías y cualquier horno de cocción en sustitución al uso de leña común, además de poder distribuirse para uso doméstico para estufas, cocinas, parrillas, barbacoas, etc.

Cabe mencionar que la producción de briquetas a partir de residuos biomásicos tales como Rumen y Aserrín, pretende reducir el impacto ambiental que genera el uso de leña o carbón, por tratarse de reutilización de residuos y a la vez por ser una fuente más eficiente de energía para diferentes procesos que involucre el uso de estos combustibles.

El rumen utilizado proviene del matadero Nuevo Carnic donde en algunos casos es utilizado para la elaboración de un tipo de abono, sin embargo, su uso no es constante por la abundancia de otras materias primas que ellos poseen para el mismo fin y este suele estar almacenado mucho tiempo. Por tal razón, se estaría dándole un uso más efectivo a este otro residuo industrial.

## **V. MARCO TEÓRICO**

### **5.1 Biomasa**

Se le puede llamar Biomasa a la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. Las plantas transforman la energía radiante del Sol en energía química a través de la fotosíntesis, y parte de esa energía química queda almacenada en forma de materia orgánica; la energía química de la biomasa puede recuperarse quemándola directamente o transformándola en combustible. Esta es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el ser humano.

#### **5.1.1 Consumo de Biomasa como Energía**

La Biomasa como Rumen y serrín son usados en elaboración de abonos o para la producción de muebles de material compactado, predominantemente. Se debe realizar un esfuerzo para evitar el desperdicio de combustibles tradicionales como la leña u otros residuos forestales. Estos residuos son generalmente quemados causando la contaminación del ambiente. Además, la ceniza contiene una proporción grande de carbono no quemado producido por la combustión incompleta.

La Biomasa compactada puede ser usada para aplicaciones domésticas como cocina y calefacción, pero también para aplicaciones industriales pequeñas a gran escala. Estas aplicaciones se extienden para el procesamiento de mineral (ladrillos, azulejos, cerámicas, etcétera.), comida y el procesamiento de agro, los tejidos (teñir, etcétera).

### 5.1.2 Tipos de biomasa

Los recursos biomásicos se presentan en diferentes estados físicos que determinan la factibilidad técnica y económica de los procesos de conversión energética que pueden aplicarse a cada tipo en particular. Por ejemplo, los desechos forestales indican el uso de los procesos de combustión directa o procesos termoquímicos, los residuos animales indican el uso de procesos anaeróbicos (bioquímicos), etc. El estado físico de la biomasa puede clasificarse según el tipo de recurso, como se indica en la tabla 1.

Recursos de Biomasa	Tipo de Residuo
Residuos Forestales	Restos de Aserríos: Cortezas, aserrín, astillas
	Restos de ebanistería: Aserrín, trozos, astillas
	Restos de Plantaciones: Ramas, cortezas, raíces
Residuos Agropecuarios	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales
	Cáscara y polvo de granos secos ( Arroz, café)
	Estiércol
	Residuos de cosechas: Tallos y hojas, cáscara, maleza y pastura
Residuos Industriales	Pulpa y cáscara de frutas y vegetales
	Residuos de procesamiento de carnes
	Aguas de lavado y precocido de carnes y vegetales
	Grasas y aceites vegetales
Residuos Urbanos	Aguas negras
	Desechos domésticos orgánicos (cáscara de vegetales)
	Basura orgánica (madera)

**Tabla 5. 1 Tipos de Residuos biomásicos<sup>3</sup>**

### **5.1.3 Biomosas utilizadas para la elaboración de las Briquetas**

#### **5.1.3.1 Madera**

Un producto biovegetal es la madera, es una sustancia dura, resistente e higroscópica que absorbe y desprende agua en forma de vapor con mucha facilidad, debido al elevado contenido en celulosa y a la doble vía de acceso capilar y micelar. Constituye el tronco de los árboles y se ha utilizado durante miles de años como combustible y como material de construcción. Aunque el término madera se aplica a materias similares de otras partes de las plantas, incluso a las llamadas venas de las hojas, también se le puede llamar así a otros materiales sólidos.

La energía desprendida en su combustión ha sido utilizada por el hombre desde hace siglos para calentarse y para cocinar sus alimentos, aún en las zonas rurales la leña juega un rol muy importante como energía para el hogar, y es de crucial importancia, porque los pobladores tienen escaso acceso al gas y al kerosén.

La madera también se usa para producir carbón vegetal o carbón de leña, que tiene un poder calorífico mucho más alto que la leña. Las plantaciones forestales pueden producir energía vegetal, a través del proceso fotosintético.

##### **5.1.3.1.1 Aserrín**

El aserrín, es un pedazo de material en forma de lámina enrollada, espiral o polvillo que es extraído mediante un cepillo u otras herramientas, tales como brocas, al realizar trabajos de labrado sobre la madera. En algunos casos se da el mismo nombre cuando se trabaja con metales.

---

<sup>3</sup>Biomasa: alternativa sustentable para la producción de Biogás Leila Carballo Abreu 2008



Todos los combustibles contienen una cantidad de agua, pero, para la biomasa como el aserrín, los niveles pueden ser altos; esto afecta el valor calorífico y el proceso de combustión. El contenido de humedad puede variar dependiendo del tipo de biomasa, el tiempo entre su producción y su uso; y la humedad del ambiente.

Los residuos de procesos forestales son una importante fuente de biomasa que actualmente es poco explotada. Se considera que de cada árbol extraído para la producción maderera, sólo se aprovecha comercialmente un porcentaje cercano al 20%. Se estima que un 40% es dejado en él, en las ramas y raíces, a pesar de que el potencial energético es mucho y otro 40% en el proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y serrín.<sup>4</sup>

#### **5.1.3.1.2 Usos del Aserrín**

- ✓ Embalaje y protección de paquetes.
- ✓ Elaboración de maderas conglomeradas
- ✓ Empleado como material de aislamiento
- ✓ Empleado como Compost en jardines
- ✓ Biomasa

#### **5.1.3.2 Biocombustible**

Cualquier combustible sólido, líquido o gaseoso producido a partir de materia orgánica, se conoce como biomásico. La mayoría de los desechos de aserrío son aprovechados para generación de calor, en sistemas de combustión directa, en algunas industrias se utilizan para la generación de vapor. Los desechos de

---

<sup>4</sup> <http://www.emagister.com/curso-biomasa-energias-renovables/plantaciones-energeticas-residuos-forestales>

campo, en algunos casos, son usados como fuente de energía por comunidades aledañas, pero la mayor parte no es aprovechada por el alto costo del transporte.

En la actualidad se están desarrollando cultivos intensivos energéticos que generan obtención de biomasa, o bien como materia prima para obtener otro tipo de combustible. Tal es el caso de los ingenieros azucareros los cuales generan energía eléctrica para sus propias plantas y en la mayoría generan más energía la cual es entregada al sistema de distribución nacional.

#### **5.1.3.2.1 Biodiesel**

El biodiesel es un biocombustible líquido producido a partir de los aceites vegetales y grasas animales, siendo la colza, el girasol y la soja las materias primas más utilizadas para este fin.

Las propiedades del biodiesel son prácticamente las mismas que las del gasóleo de automoción en cuanto a densidad y número de cetano. Además, presenta un punto de inflamación superior. Por todo ello, el biodiesel puede mezclarse con el gasóleo para su uso en motores e incluso sustituirlo totalmente si se adaptan éstos convenientemente.

#### **5.1.3.3 Material Ruminal**

El rumen, retículo y omaso son órganos que anteceden al abomaso (estómago glandular) de los rumiantes, razón por la que se denominan pre-estómagos. La capacidad de los rumiantes para aprovechar los carbohidratos fibrosos de la dieta, está sustentada en la función de estas tres estructuras.

El rumen es el más grande de los pre-estómagos, se divide en sacos o compartimientos separados por pilares musculares. El material a utilizar en este estudio es el resultado de la digestión de los bovinos cuando se encuentra en el rumen, es decir, antes de pasar a denominársele estiércol.

## **5.2 Aglutinantes**

Materiales aglutinantes son productos pulverizados que, cuando se mezclan con agua, sufren unas transformaciones químicas que producen su endurecimiento al aire o bajo el agua. La fabricación de briquetas a bajas presiones suelen requerir de aglutinantes como arcilla, almidón, alquitrán. Aunque el aglutinante no combustible disminuye el valor calorífico de la briqueta y aumenta el contenido de cenizas, proporciona un combustible que de otra manera no podría aprovecharse.

## **5.3 Combustibles**

Combustibles cualquier material capaz de liberar energía cuando se oxida de forma violenta con desprendimiento de calor poco a poco. Supone la liberación de una energía de su forma potencial (energía de enlace) a una forma utilizable sea directamente (energía térmica) o energía mecánica (motores térmicos) dejando como residuo calor (energía térmica), dióxido de carbono y algún otro compuesto químico. En general se trata de sustancias susceptibles de quemarse.

### **5.3.1 Tipos de combustibles**

Entre los combustibles sólidos se incluyen el carbón, la madera y la turba. El carbón se quema en calderas para calentar agua que puede vaporizarse para mover máquinas a vapor para producir calor utilizable en usos térmicos (calefacción). La turba y la madera se utilizan principalmente para la calefacción doméstica e industrial, aunque la turba se ha utilizado para la generación de energía.

Entre los combustibles fluidos, se encuentran los líquidos como el gasóleo, el queroseno o la gasolina(o nafta) y los gaseosos, como el gas natural o los gases licuados de petróleo(GLP), representados por el propano y el butano. Las gasolinas, gasóleos y hasta los gases, se utilizan para motores de combustión interna. El combustible se utiliza en autos lo que contamina grandes ciudades y también el medio ambiente.

Los combustibles normalmente utilizados en la industria pueden clasificarse:

- Según su estado de agregación:
- Combustibles sólidos: los carbones (antracita, hullas lignito, turba) el coque, la madera.
- Combustibles líquidos: gas-oíl, fuel-oíl, petróleo, gasolinas.
- Combustibles gaseosos: gas natural, gases licuados del petróleo gases manufacturados.

### **5.3.2 Composición de los combustibles**

La composición general de los combustibles es:

- a) Esencialmente por carbono (C) e hidrógeno ( $H_2$ ) sea en forma libre o combinada en forma de hidrocarburos.
- b) Azufre, si bien esta especie no se tolera más que en pequeños porcentajes debido a los efectos perjudiciales de sus compuestos con oxígeno.
- c) Oxígeno, que puede encontrarse bien inicialmente fijado al carbono e hidrogeno, bien presente en estado libre en el combustible (caso de las mezclas aire-propano).
- d) Inertes como son la humedad, las cenizas, el  $CO_2$  y el nitrógeno.

## 5.4 Características Físicas y Química

En esta sección se muestran las características más importantes que determinan la eficiencia de un combustible para diferentes tipos de residuos biomásicos.

Tipo de Residuo	Características Físico-Químicas
Restos de Aserríos: Cortezas, aserrín, astillas	Polvo, sólido, Humedad relativa (HR) >50%
Restos de ebanistería: Aserrín, trozos, astillas	Polvo, sólido, Humedad relativa (HR) 30-45%
Restos de Plantaciones: Ramas, cortezas, raíces	Sólido, HR>55%
Cáscara y pulpa de frutas y vegetales	Sólido, alto contenido de humedad
Cáscara y polvo de granos secos ( Arroz, café)	Polvo, HR <25%
Estiércol	Sólido, alto contenido de humedad
Residuos de cosechas: Tallos y hojas, cáscara, maleza y pastura	Sólido, HR>55%
Pulpa y cáscara de frutas y vegetales	Sólido, Humedad moderada
Residuos de procesamiento de carnes	Sólido, alto contenido de humedad
Aguas de lavado y precocido de carnes y vegetales	Líquido
Grasas y aceites vegetales	Líquido, Grasoso
Aguas negras	Líquido
Desechos domésticos orgánicos (cáscara de vegetales)	Sólido, alto contenido de humedad
Basura orgánica (madera)	Sólido, alto contenido de humedad

**Tabla 5. 2 Características Físico-Químicas de los Residuos**

### 5.4.1 Humedad Relativa (H.R)

El contenido de humedad de la biomasa es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%.

“En general, los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy superior, que obliga a implementar operaciones de acondicionamiento, como procesos de secado a intemperie o centrifugación, lo cual incrementa los costos, antes de ingresar al proceso de conversión de energía”.<sup>5</sup>

El contenido de humedad, o humedad relativa, se define como la cantidad de agua presente en la biomasa, expresada como un porcentaje del peso. Para combustibles de biomasa, este es el factor más crítico, pues determina la energía que se puede obtener por medio de la combustión. Cuando se quema la biomasa, primero se necesita evaporar el agua antes de que el calor esté disponible; por eso, cuanto más alto el contenido de humedad, menos el valor calorífico.

#### **5.4.2 Porcentaje de Cenizas**

El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos que incluyen la combustión de la biomasa, es importante conocer la generación de ceniza y su composición, pues, en algunos casos, ésta puede ser utilizada.

La ceniza es el producto de la combustión de algún material, compuesto por sustancias inorgánicas no combustibles, como sales minerales. Parte queda como

---

<sup>5</sup>(Steverson, E. M., Semler, T. T. and Goldsberry, J.A 1985).

residuo en forma de polvo depositado en el lugar donde se ha quemado el combustible (madera, basura, etc.) y parte puede ser expulsada al aire como parte del humo.

### **5.4.3 Poder Calórico**

Calor específico de combustión, calor de combustión, valor calórico, o potencia calórica es la cantidad de calor que se desprende cuando ocurre la combustión completa de una unidad de masa y se expresa en KJ/Kg en el caso de los combustibles sólidos y líquidos. En condiciones de laboratorio se determina la totalidad del calor específico hasta enfriar los productos a la temperatura ambiente se obtendrá el llamado calor específico de combustión superior.

El contenido calórico por unidad de masa es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa; y está relacionado directamente con su contenido de humedad. Un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia de la combustión debido a que una gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material.

El poder calorífico expresa la energía máxima que puede liberar la unión química entre un combustible y el comburente y es igual a la energía que mantenía unidos los átomos en las moléculas de combustible (energía de enlace), menos la energía utilizada en la formación de nuevas moléculas en las materias (generalmente gases) formadas en la combustión.

La mayoría de los combustibles usuales son compuestos de carbono, que al arder se combinan con el oxígeno formando dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y agua ( $H_2O$ ) respectivamente. El poder calorífico superiores el calor verdaderamente producido en la reacción de combustión y poder calorífico inferior es el calor realmente aprovechable, este último es calor producido sin aprovechar la energía de la condensación del agua y otros procesos de pequeña importancia.

#### **5.4.3.1 Cálculo de Poder Calórico**

En diferentes fuentes puede encontrarse información referente a los poderes Caloríficos de diversos combustibles; sin embargo, estos valores pueden cambiar dependiendo de algunos factores, como el proceso de producción del combustible, la materia prima usada para obtenerlos, entre otros. Debido a esto, son muy importantes las mediciones del poder calorífico de los combustibles, para lo cual se recomienda el uso de una bomba calorimétrica.

En este equipo, el combustible cuyo poder calorífico se desea determinar se coloca en un crisol para combustible (si el combustible es sólido, deberá colocarse en forma de pastilla) dentro de la bomba calorimétrica. Adicionalmente se agrega el oxígeno necesario para la combustión. La bomba calorimétrica se rodea de una camisa de agua que absorberá el calor liberado por el combustible. Todo esto se realiza dentro de una camisa adiabática para evitar fuga de calor que afecte el proceso. Sin embargo, el calor que absorbe el agua no es el poder calorífico del combustible, debido a diversos factores, entre los cuales pueden nombrarse: absorción de calor por la propia bomba, liberación de calor del alambre que provoca el encendido del combustible, liberación de calor por la formación de ácido nítrico y sulfúrico, entre otros.

Al aplicar la ecuación de Primera Ley al proceso de combustión a volumen constante, tomando en cuenta todos los factores nombrados con anterioridad, se obtiene la siguiente ecuación:

$$H = \frac{M_s C_{v_s} \Delta T - e_1 - e_2}{M_c}$$

$$e_2 = m \cdot h$$

donde  $M_s$  es la masa de la bomba calorimétrica, sus accesorios y el agua utilizada (masa del sistema);  $C_{v_s}$  es el calor específico promedio de la bomba calorimétrica, sus accesorios y el agua utilizada (calor específico del sistema);  $\Delta T$  es el cambio de temperatura registrado durante la experiencia;  $H$  es el poder calorífico del combustible;  $e_1$  es la corrección por el calor que libera la formación de ácidos de



nitrógeno y azufre (puede despreciarse en esta experiencia);  $e_2$  es la corrección por el calor generado por la combustión del filamento de ignición; “m” es la masa o longitud del filamento de ignición; “h” es el poder calorífico del filamento por unidad de masa o longitud;  $M_c$  es la masa de combustible.

Debido a que los gases producidos durante la combustión al final se encuentran a temperaturas bastante bajas y a que el ensayo se lleva a cabo a alta presión, la mayor parte del agua presente en los productos condensa, por lo cual el poder calorífico que se estará determinando en esta experiencia es el superior. Como no se puede medir en el laboratorio la cantidad de agua presente después de la combustión, es imposible el cálculo del poder calorífico inferior del combustible.

#### **5.4.4 Densidad**

La densidad es la masa de un cuerpo por unidad de volumen. En ocasiones se habla de densidad relativa que es la relación entre la densidad de un cuerpo y la densidad del agua a 4 °C, que se toma como unidad.<sup>6</sup> Como un centímetro cúbico de agua a 4 °C tiene una masa de 1 g, la densidad relativa de la sustancia equivale numéricamente a su densidad expresada en gramos por centímetro cúbico.

La densidad puede obtenerse de varias formas. Por ejemplo, para objetos macizos de densidad mayor que el agua, se determina primero su masa en una balanza, y después su volumen; éste se puede calcular a través del cálculo si el objeto tiene forma geométrica, o sumergiéndolo en un recipiente milimetrado el cual contenga agua en un nivel previamente establecido y luego se puede observar la diferencia en el volumen que muestra el recipiente el cual será el volumen del objeto o material agregado.

La densidad es el resultado de dividir la masa por el volumen. Para medir la densidad de líquidos también se utiliza el densímetro, que proporciona una lectura directa de la densidad sin necesidad de calcular antes su masa y volumen. Este

---

<sup>6</sup> [http://html.rincondelvago.com/densidad\\_3.html](http://html.rincondelvago.com/densidad_3.html)

aparato normalmente está hecho de vidrio y consiste en un cilindro hueco con un bulbo pesado en su extremo para que pueda flotar en posición vertical.

#### **5.4.4.1 Densidad Aparente**

Esta se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta, bajo condiciones dadas. Combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose menores tamaños de los equipos y aumentando los períodos entre cargas.

Por otro lado, materiales con baja densidad aparente necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte y, algunas veces, presentan problemas para fluir por gravedad, lo cual complica el proceso de combustión, y eleva los costos del proceso.

#### **5.4.5 Resistencia**

La resistencia de materiales clásica es una disciplina de la ingeniería mecánica y la ingeniería estructural que estudia los sólidos deformables mediante modelos simplificados. La resistencia de un elemento se define como su capacidad para resistir esfuerzos y fuerzas aplicadas sin romperse, adquirir deformaciones permanentes o deteriorarse de algún modo. Un modelo de resistencia de materiales establece una relación entre las fuerzas aplicadas, también llamadas cargas o acciones, y los esfuerzos y desplazamientos inducidos por ellas. Generalmente las simplificaciones geométricas y las restricciones impuestas sobre el modo de aplicación de las cargas hacen que el campo de deformaciones y tensiones sean sencillos de calcular.

Para el diseño mecánico de elementos con geometrías complicadas la resistencia de materiales suele ser insuficiente y es necesario usar técnicas basadas en la teoría de la elasticidad o la mecánica de sólidos deformables más generales. Esos problemas planteados en términos de tensiones y deformaciones pueden entonces ser resueltos de forma muy aproximada con métodos numéricos como el análisis por elementos finitos.

## 5.5 Combustión

La combustión es una reacción química de oxidación, en la cual generalmente se desprende una gran cantidad de energía, en forma de calor luz, manifestándose visualmente como fuego. En toda combustión existe un elemento que arde (combustible) y otro que produce la combustión (comburente), generalmente oxígeno. Los explosivos tienen oxígeno ligado químicamente por lo que no necesitan el oxígeno del aire para realizar la combustión.

Los tipos más frecuentes de combustible son los materiales orgánicos que contienen carbono e hidrógeno. En una reacción completa todos los elementos tienen el mayor estado de oxidación. Los productos que se forman son el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y el agua, el dióxido de azufre ( $SO_2$ ) (si el combustible contiene azufre) y pueden aparecer óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), dependiendo de la temperatura y la cantidad de oxígeno en la reacción.

En la combustión incompleta los productos que se queman pueden no reaccionar con el mayor estado de oxidación, debido a que el comburente y el combustible no están en la proporción adecuada, dando como resultado compuestos como el monóxido (CO). Además, pueden generarse cenizas.

### 5.5.1 Gases de combustión

Los gases de combustión son gases producidos como resultado de la combustión de gasolina/petróleo, diésel o carbón. Se descarga a la atmósfera a través de una tubería o chimenea. Aunque gran parte de los gases de combustión está compuesto por el relativamente inofensivo dióxido de carbono, también contiene

sustancias nocivas o tóxicas como el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y aerosoles.

## **5.6 Procesos de Conversión**

Antes de que la biomasa pueda ser usada para fines energéticos, tiene que ser convertida en una forma más conveniente para su transporte y utilización. A menudo, la biomasa es convertida en formas derivadas tales como carbón vegetal, briquetas, gas, etanol y electricidad. Las tecnologías de conversión incluyen desde procesos simples y tradicionales, como la producción de carbón vegetal en hogueras bajo tierra, hasta procesos de alta eficiencia como la cogeneración (procedimiento mediante el cual se obtiene simultáneamente energía eléctrica y energía térmica útil)

### **5.6.1 Tipos De Conversión de la Biomasa**

#### **5.6.1.1 Conversión Termoquímica**

La conversión termoquímica está basada en la descomposición de la biomasa por medio de calor. Esta transforma a la biomasa en productos con un alto valor o más convenientes y, dependiendo de las condiciones del proceso, se obtienen diferentes proporciones de productos sólidos, líquidos y gaseosos.

Los procesos son:

- ✓ Combustión directa
- ✓ Pirolisis
- ✓ Gasificación

#### **5.6.1.2 Conversión Bioquímica**

Consisten en la transformación de la biomasa por la acción de microorganismos o enzimas, que son añadidas a los medios de reacción como catalizadores.

Los métodos bioquímicos son más adecuados a biomásas con un alto contenido de humedad, debido a que tanto los microorganismos como las enzimas sólo

pueden ejercer sus acciones en ambientes acuosos, entre los procesos de conversión bioquímica se encuentran:

- ✓ Digestión anaerobia
- ✓ Fermentación alcohólica

#### **5.6.1.3 Conversión Fisicoquímica (Prensado/Extracción)**

La ruta de conversión fisicoquímica produce un biocombustible líquido a partir de la biomasa que contiene aceite vegetal. Esta tecnología es similar a las rutas de conversión para producir aceite vegetal en la industria alimenticia.

El aceite vegetal se produce al prensar y/o extraer el aceite de la semilla, de manera que sólo se pueden usar especies que contienen aceite, como la semilla de colza, el girasol, el frijol de soya y el aceite de palma, etc.

#### **5.6.1.4 Descomposición Anaerobia**

El proceso anaerobio es aquel en que se efectúa la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno molecular como aceptor de electrones. Tal es el caso, por ejemplo, de los procesos de producción de alcohol, los procesos de desnitrificación y de digestión anaerobia, estos dos últimos empleados en el tratamiento de aguas residuales.

Los procesos de digestión anaerobia ocurren normalmente en la naturaleza, siendo los nichos de estos procesos el fondo de los ríos, los lagos y el mar, las ciénagas y el tracto intestinal de, prácticamente, todos los animales.

La ventaja principal de los procesos anaerobios con relación a los aerobios se fundamenta en la transformación de la materia orgánica a través de una tecnología de bajo consumo energético, obteniéndose, un balance comparativo de energía y de masa entre ambos procesos.

### **5.6.1.5 Aglomeración O Densificación**

Ni la madera ni los desechos agrícolas, como serrín y cáscaras de café, cascarilla de arroz, etc. pueden quemarse directamente en estufas domésticas. Tales materiales arden con dificultad, producen mucho humo y no son apropiados para cocinar. Lo mismo puede decirse del polvo de carbón vegetal.

Uno de los mejores métodos para aprovechar dichos residuos consiste en la aglomeración de pequeñas partículas en briquetas. Existen dos métodos principales para fabricar briquetas, con aglutinante o sin él. Es más conveniente sin aglutinante, pero para ello se requieren prensas complicadas y costosas, equipo de secado y mucha energía.

#### **5.6.1.5.1 Aspectos Fundamentales en la Densificación**

Se deben tener en cuenta fundamentalmente a la hora de la densificación de biomasa, los siguientes aspectos:

- Que los productos (pellets, briquetas, etc.) mantengan sus propiedades como sólidos compactados hasta que cumplan su función (durante su manipulación, transporte, almacenaje, dosificación y combustión).
- Que se comporten satisfactoriamente como combustibles, dentro de un sistema integral concebido.
- Las biomásas como la paja de caña, la cáscara de arroz y el aserrín con su “elasticidad natural”, requieren para su densificación en briquetas, mayores presiones que los materiales inorgánicos, debido a la necesidad de romper las paredes celulares mediante presión y temperatura.

Idealmente, se analizan los requerimientos del transporte, manipulación, almacenaje y combustión, calidad del servicio energético, impactos al medio y sobre los productos, residuales y desechos, etc., y luego, a partir de las características físicas y químicas del combustible sólido de baja densidad

disponible, se escoge el método de preparación y densificación óptima y la máquina capaz de lograrlo, la transportación y el almacenaje, el sistema de combustión.

Factores que inciden y regulan este proceso

- La composición física y química del material.
- La presión
- La temperatura durante el proceso.

Por lo general, las biomasas residuales como compuestos ligno-celulósicos, aportan la lignina propia como aglutinante, no comportándose así el serrín que necesita de un aglutinante para que mantengan sus propiedades como sólidos compactados durante su manipulación, transporte, almacenaje, dosificación y combustión.

La temperatura, dependiendo de la briqueteadora, se relaciona con la presión debido a la fricción interna entre las partículas y con la pared del molde y algunas veces se usan fuentes externas de calor (se calienta el molde en su sección de entrada). El que se use un aglutinante externo o no depende de la briqueteadora que se utilice y del material original. En máquinas de alta presión ( $>100$  MPa), raramente se usa aglutinante externo, en medias presiones (5-100 MPa) depende del material y su compactación, en bajas presiones hasta 5 MPa siempre es necesario añadir aglutinante. Por ejemplo, cuando se calienta lamadera (serrín) sobre su rango de temperatura de plasticidad (165 C) se pierde su elasticidad y se comprime más fácilmente.<sup>7</sup>

La humedad, desempeña un importante papel en la densificación, ayuda a la transferencia del calor y mejora la plasticidad del material. Si el material está muy húmedo o muy seco las presiones necesarias se incrementan drásticamente. Algunas veces se usan aditivos para facilitar el encendido uniforme y mejorar las características del combustible.

---

<sup>7</sup> <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia13/HTML/articulo03.htm>

#### **5.6.1.5.2 Detalles de la densificación**

La mayoría de las desventajas que tiene el uso de la biomasa como combustible se derivan de su baja densidad física y energética. Por eso es tan importante su densificación. La densificación de la biomasa se puede definir como su compresión o compactación, para disminuir los espacios vacíos entre las partículas y dentro de las partículas.

Productos compactados con menos de 30 mm.de diámetro son considerados convencionalmente pallets y con diámetros mayores, briquetas. Los productos compactados no aglutinados son conocidos por bultos o pacas. La formación de briquetas, pallets, pacas, etc. se justifica no sólo por la reducción del volumen de los combustibles, sino también por la transformación de sus propiedades. En los últimos años se ha venido creando una conciencia cada vez mayor sobre el empleo de residuos de madera compactada en forma de briquetas, bolas o "tramos", como combustible doméstico o industrial.

Las briquetas se forman generalmente haciendo pasar el serrín o las virutas secas u otra biomasa a través de algún tipo de prensa. La presión ejercida y el calor resultante generado aglomeran las partículas en forma de "leños" artificiales. De la densificación resulta un producto con unas características excelentes de manipulación y almacenamiento, con una concentración de energía superior al de la madera.

#### **5.6.1.5.3 Influencia de la Humedad en la Compactación**

Por una parte a causa de las grandes presiones internas que se levantan en las prensas de pistón, sólo se pudieran "briquetear" combustibles relativamente secos. El incremento de la humedad causa mayor cantidad de vapor de agua que



se genera durante la compresión, el cual o rompe la briqueta por su superficie al enfriarse o puede producir una explosión que lanza la briqueta como un proyectil.

Por otra parte mientras menor sea la humedad del material inicial, la fricción en el proceso aumenta y con ello se incrementa la demanda de energía. Los límites de humedad dependen del material y el tipo de “briqueteadora” que se utiliza. Estas limitaciones de humedad y el control de la homogeneidad del proceso, exigirían en muchos casos el secado como paso previo o al menos el control de la humedad.

El secado de la materia antes de su extrusión se suele realizar en secadoras de tambores giratorios en grandes industrias, caldeadas por un porcentaje de la producción de la planta. Pero para disminuir los costos, tratándose de producción a baja escala, suele realizarse el secado natural dejando el material biomásico a la intemperie por un tiempo determinado.

#### **5.6.1.5.4 Tamaño de las partículas**

Para la formación de briquetas se espera que sólo lo que puedas palear, lo podrás briquetear. En general, el material a briquetear idealmente suele contener partículas largas y cortas. La longitud misma de la partícula dependerá del material y diámetro del molde. Mientras mayor sea la máquina y el molde, mayor podrá ser la partícula. En muchos casos esta restricción obliga a introducir la molienda previa del material.

### **5.7 Briquetas y sus ventajas**

Restos de madera, virutas, etc. son desechos que ocupan un valioso espacio. Gracias a las briquetas compactas se rebajan los gastos de almacenaje y de

transporte. Además es un combustible a almacenar muy seguro ya que el peligro de que las briquetas ardan por sí mismas durante su almacenaje es mínimo.

Un elemento a tener presente es el rendimiento en combustible quemado de las briquetas, siendo una característica muy importante que debe ser evaluada. Está definida como la razón entre la cantidad en peso de briquetas quemadas, y la máxima cantidad de material que puede ser quemado.

“Al quemar un kilogramo de briqueta estamos ahorrando tres kilogramos de leña”.<sup>8</sup>

Los residuos convertidos en una forma de briqueta tienen las siguientes ventajas:

- El proceso aumenta el valor calorífico por volumen de la unidad.
- El producto del densificado es fácil de transportar y guardar.
- El proceso ayuda resolver el problema de disposición del residuo.
- El combustible producido es uniforme en tamaño y calidad.
- El proceso también ayuda a reducir la deforestación manteniendo a un suplente de la madera como combustible.
- Fácil y rápido encendido.
- Baja humedad.
- Alta densidad.
- Ocupa menos espacio.
- Limpias.
- No causan prácticamente cenizas volátiles.
- Las briquetas se pueden quemaren cualquier estufa doméstica o industrial, aparte de otras muchas opciones como pizzerías, asadores de carne, fábricas de pan industrial o calefacciones centralizadas.
- No chispean.
- No generan gases tóxicos.

### **5.7.1 Usos de las briquetas**

#### **Calefacción**

---

<sup>8</sup>(Sebastián Fernando, Javier Royo, CIRCE, Universidad de Zaragoza. 2002)



**Hornos, pizzerías y panaderías**



## **VI. MATERIAL Y MÉTODOS**

### **6.1 Materiales y equipos**

### **6.1.1 Materiales**

Los principales materiales a utilizar se pueden dividir en variantes y constantes, esta clasificación es respecto a las proporciones que se utilizan de ellos en cada briqueta.

#### **6.1.1.1 Agentes Variantes**

Aserrín: Residuo de la fabricación de muebles en el INFIL-RUPAP

Rumen: Residuo del proceso de destace en el matadero Nuevo Carnic.

Biodiesel: Elaborado por equipo diseñado por maestro de la UNI.

#### **6.1.1.2 Agente Constante**

Aglutinante: Almidón

### **6.1.2 Equipos**

Los equipos necesarios fueron proporcionados en los laboratorios de química y Biomasa de la UNI (RUSB-RUPAP).

- Mufla
- Crisoles
- Pinzas
- Balanza analítica
- Bomba Calorimétrica
- Briqueteadora (fabricada en la UNI)

## **6.1.2.1 Construcción de Briqueteadora**

### **6.1.2.1.1 Materiales utilizados**

- Tubo cuadrado metálico de 1 pulg.
- Tubo redondo PVC de 2 pulg.
- Tubo redondo metálico de 1 ½ pulg. chapa 16.
- Gata hidráulica de 6 toneladas.
- Lámina galvanizada de 3/8 pulg.

### **6.1.2.1.2 Diseño de Briqueteadora**

Para la fabricación de briquetas tuvo que ser necesario la elaboración de una briqueteadora de manera artesanal, la cual está conformada por tres partes esenciales: La prensa hidráulica, marco estructural y moldes. Las briquetas producidas tienen medidas de 2 pulg. de diámetro y 2 pulg de alto, con peso promedio de 120 g., tienen forma cilíndrica, evitando así que se fracturen por los bordes, que son el punto débil de las briquetas hechas en casa.

La briqueteadora está diseñada para ejercer una presión de 1500 kgf/cm<sup>2</sup> sobre cada una de las briquetas. La prensa hidráulica está sujeta al marco estructural por la parte superior de manera tal sé que crea un pistón, al que previamente se les fue ensamblado una placa con pequeños moldes que ejerce presión sobre la mezcla a compactar. Los moldes inferiores es donde se coloca la mezcla previa y usando una especie de embolo de menor medida se compacta, lo que permite sacar las briquetas con mayor facilidad. Hay que mantener la base sobre el nivel del suelo. La prensa puede modificarse mediante una construcción más sólida y una prensa hidráulica de mayor presión.

## 6.2 Metodología

### 6.2.1 Diseño de experimento

Antes de analizar el procedimiento para elaborar las briquetas se realizó un diseño de experimento con 3 factores (humedad, mezcla, biodiesel) en dos niveles diferentes, el cual determinó la cantidad de pruebas y las distintas proporciones en que deben mezclarse los materiales para así determinar las características de una briketa con mejor rendimiento.

Para ello se procedió a realizar un experimento factorial  $2^k$ , utilizando el software de Minita 15, donde los factores involucrados fueron:

Factores	Niveles	Proporción
Humedad	alta	Alrededor de 10%
	baja	Alrededor de 5%
Mezcla (Aserrín/Rumen)	alta	75/25
	baja	50/50
Mezcla/Biodiesel	alta	90/10
	baja	95/5

**Tabla 6. 1 Planteamiento del experimento factorial  $2^k$**

En la tabla 6.2 se muestran los resultados del experimento factorial  $2^k$

BLOQUE	HUMEDAD	MEZCLA	MEZCLA/BIODISEL
1	2	1	2
1	1	1	2
1	2	2	1
1	1	2	2
1	2	2	2
1	2	1	1
1	1	1	1
1	1	2	1

**Tabla 6. 2 se presentan los resultaos del diseño factorial  $2^k$**

## **6.2.2 Proceso de elaboración de las briquetas**

Primeramente se efectuó la simulación de producción de briquetas en una compactadora manual con una prensa hidráulica, para probar la necesidad de utilizar un agente aglutinante, notando que al no usar el aglutinante (almidón) estas perdían considerablemente su forma y soportarían poca manipulación.

### **6.2.2.1 Toma de la Muestra de Biomasa**

Para la toma de la muestra se utilizó una pala, con la cual se llenaron 2 sacos plásticos de aserrín y Rumen. Se transportó la muestra desde INFIL- Parque tecnológico Nacional-RUPAP y Matadero Nuevo Carnic respectivamente. Se llevó un registro de cada muestra recolectada y cada saco fue debidamente rotulado. Para tal fin se ha realizado un método de muestreo manual, y se ha escogido una muestra integrada, es decir, mezclas de muestras individuales recogidas en distintos puntos al mismo tiempo.

### **6.2.2.2 Medición**

Según el diseño de experimento se pesó las cantidades exactas de rumen y aserrín para elaborar cada briqueta de manera que cumpliera con las proporciones 50/50 y 75/25, según fuese el caso.

Luego se procedió a pesar el almidón a utilizar el cual siempre debería estar alrededor del 150% del peso de la briqueta para que esta quedara en la mejor forma posible. La mayoría de este peso luego se perdería a la hora del secado. De igual forma se calculó el volumen de biodiesel a utilizar de manera que este, en masa, equivaliera al 5 o al 10% del peso total de la briqueta según el diseño de experimento.

### **6.2.2.3 Mezcla**

El aserrín, rumen y almidón fueron agregados en un recipiente y mezclados con la pieza final que se utiliza en las batidoras, esto de manera manual, hasta lograr una consistencia uniforme. El biodiesel es agregado después del prensado con un atomizador para evitar que este se pierda durante este proceso. Se realizó una mezcla por cada 3 briquetas con las mismas proporciones.

### **6.2.2.4 Prensado**

Primeramente las cantidades de mezcla fueron pesadas en una balanza electrónica para asegurar que cada briqueta contuviera dentro de lo posible el peso exacto que las demás en su categoría. Luego la mezcla pesada fue introducida dentro de los moldes de PVC de 2 pulgadas de diámetro y se procedió a bajar el pistón.

Después de prensado se tomó los moldes de PVC y las briquetas fueron empujadas hacia afuera con un tubo de diámetro inferior al molde. Estas salían fácilmente ya que las paredes de los moldes son bastantes lisas y en ese momento las briquetas tenían mayor porcentaje de humedad. Una vez las briquetas estaban afuera, se procedió a pesar para calcular el porcentaje de humedad perdido durante este proceso.

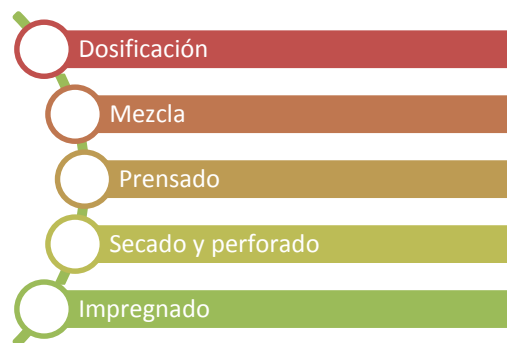


### 6.2.2.5 Secado y perforado

Luego del prensado las briquetas fueron medidas y pesadas, para luego ser expuestas al sol durante al menos dos días, dependiendo del clima. Estas redujeron considerablemente su peso durante estos días por la pérdida de humedad. Después del secado realizaron perforaciones pequeños en ambas bases de la briqueta para procurar el movimiento del oxígeno necesario para una mejor combustión.

### 6.2.2.6 Impregnado

Por último se procedió a impregnar las briquetas con biodiesel entre un 5 y 10% según el caso, utilizando un atomizador y tomando en cuenta la pérdida por dispersión.



## 6.2.3 Elaboración de los cálculos

### 6.2.3.1 Análisis Físico de la Biomasa

Para la determinación de la densidad, se procede de la siguiente manera:

#### a) Cálculo del Volumen de la Briqueta

El volumen de la briqueta es el de un cilindro, el cual es el producto del área de la base "Ab" por la altura del cilindro "h"

El volumen de un cilindro de base circular, es:

$$V = \frac{\pi \phi^2}{4} \times h \quad (\text{ec.6.1})$$

Dónde:

$\phi$  = Diámetro de la base

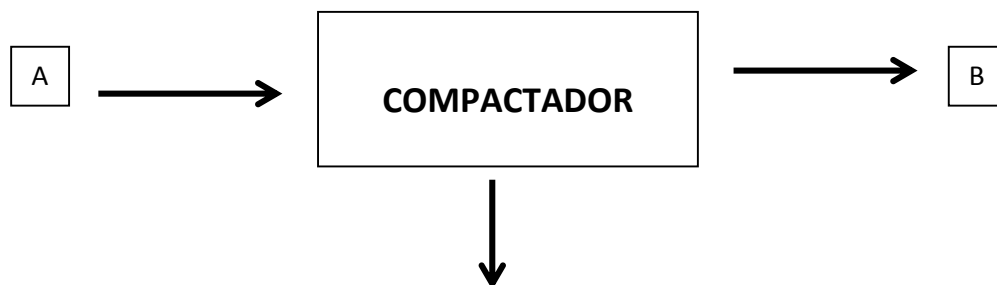
h = altura de la briqueta

- b) Luego se pesa la briqueta y se calcula la densidad dividiendo el peso sobre el volumen calculado, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{P}{V}$$

### 6.2.3.2 Variación de humedad en el prensado

Para realizar el balance se considera los datos preliminares de los ensayos obtenidos en forma de placas rectangulares que ayudaron a determinar cuál sería la presión que necesitaría para poder compactar la biomasa.



Dónde:

$P_1 = ?$

A = Biomasa sin Compactar

B = Biomasa Compactada

$P_1$  = Agua eliminada por la compactación

Se plantea la ecuación general de balance de masa para este proceso:

$$A = B + P_1$$

Como se desea conocer la cantidad de agua que se pierde se despeja  $W$ :

$$P_1 = A - B \quad (\text{ec. 6.2})$$

### **6.2.3.3 Cálculo pérdida de humedad durante el secado**

M2: Masa luego de Compactar

M3: Masa después de secado

Se plantea la ecuación:

$$P_2 = M3 - M2 \quad (\text{ec. 6.3})$$

Se procede a encontrar la densidad húmeda y seca de la muestra compactada:

$$\rho_1 = \frac{M2}{V} \quad (\text{ec. 6.4})$$

$$\rho_2 = \frac{M3}{V} \quad (\text{ec. 6.5})$$

A) Variación de la densidad

$$\Delta\rho = \frac{\rho_1}{\rho_1 - \rho_2} \times 100 \quad (\text{ec 6.6})$$

## **6.2.3.4 Pruebas de Laboratorio**

### **6.2.3.4.1 Determinación de la Resistencia a la Compresión**

Para la realización de esta prueba se procedió a tomar 8 muestras de briquetas distribuidas según su mezcla, es decir, 4 de mezcla a 50/50 y 4 de mezcla 75/25.

Se utilizó una prensa universal para resistencia de materiales en el laboratorio Julio Padilla de la Facultad de la construcción (FTC), de la UNI-RUPAP.

Se realizaron las pruebas con la prensa hidráulica con manómetro incluido, de manera tal que al colocar las briquetas sobre una base plana y aplicársele presión, este estaba marcando constantemente la presión ejercida y se tomó el registro cuidadosamente hasta el momento en que esta sufriera alguna fisura.

### **6.2.3.4.2 Determinación de la Humedad de Aserrín y Rumen**

La humedad es el porcentaje de agua presente en un cuerpo o materia; puede determinarse en base seca o en base húmeda y representa una característica importante para cualquier análisis a realizarse sobre un material sólido.

Para la realización de esta prueba se requirió el siguiente equipo y material de laboratorio:

- 6 Crisoles
- Balanza analítica
- Estufa
- Desecador

Se realizaron los siguientes pasos:

1. Se colocó el crisol o bandeja a peso constante, sometiéndolo a  $100 \pm 5^\circ\text{C}$ .
2. Se pesó el recipiente.
3. Se pesó aproximadamente 10 g de muestra y colocarlo en el recipiente que se puso a peso constante con anterioridad.

4. Se procedió a colocar el recipiente junto con la muestra en una estufa a una temperatura de 100 +/- 5°C durante aproximadamente 6 horas.
5. Dejar enfriar en un desecador para evitar que el residuo absorba humedad.
6. Pesar el recipiente más la muestra. (P2)
7. Volver a colocar el recipiente con la muestra dentro de la estufa y mantenerlo a 100°C durante 2 horas.
8. Dejar enfriar el desecador.
9. Pesar el recipiente más la muestra.(P3)
10. Si existe una diferencia de pesos de 0.05 entre P2 Y P3 ya no volver a colocar en la mufla.
11. Para determinar el contenido de humedad se aplica la siguiente ecuación:

Peso fase solida = (P1-P3)

$$\% \text{ Sólidos} = \frac{\text{Peso fase solida}}{P1} \times 100 \quad (\text{ec. 6.7})$$

% Humedad = 100 - % Sólidos

En ambos casos se realizó 3 muestras diferentes y se calculó el promedio como resultado final (Cálculos realizados en una hoja de Excel).

#### **6.2.3.4.3 Determinación de Ceniza del Aserrín y Rumen**

El término cenizas está definido por el porcentaje en base seca, del cociente de la muestra calcinada y la muestra seca.

Esta prueba se realizó de acuerdo a la norma NOM-AA-018-SEMARNAT-1984. Para llevar a cabo esta prueba se requirió del siguiente equipo y material de laboratorio:

- Mufla que alcance hasta 1000°C.
- 6 crisoles
- Desecador
- Pinzas

Se deben seguir los siguientes pasos:

- Se tomó el recipiente previamente pesado. (G1)
- Se tomó las muestras previamente secadas
- Se pesó la mezcla junto con el recipiente (G2)
- Se Calcinó en el horno a 1073K (800°C) hasta obtener peso constante (se recomienda comprobar el peso constante transcurrida en una hora), se dejó enfriar en el desecador y se pesó. Se tuvo precaución para evitar que la muestra quedase expuesta a corrientes de aire. (G3)

1. El porcentaje de cenizas en base seca se calculó con la siguiente formula:

$$C = \frac{G3 - G1}{G2 - G1} \times 100 \quad (\text{ec. 6.8})$$

En ambos casos se realizó 3 muestras diferentes y se calculó el promedio como resultado final (Cálculos realizados en una hoja de Excel)

#### **6.2.3.4.4 Determinación del poder calorífico**

##### **6.2.3.4.3.1 Preparación del Equipo**

Se toman de 1 a 1,5 gramos de combustible pulverizado y se fabrica una pastilla. Si el combustible es líquido, se toman con una pipeta de 1 a 1,5 mililitros. El combustible debe colocarse en el crisol de la bomba. El recipiente del agua se llena con 2000 a 2200 gramos de agua. Se corta un trozo de alambre de ignición de 15 cm y se ata firmemente a los electrodos de la bomba calorimétrica, asegurándose que el alambre toque el combustible. Se cierra la bomba, se presuriza con oxígeno a 20 atmósferas y se introduce en el recipiente del agua. Se introduce el recipiente dentro de la camisa adiabática y se coloca la tapa correspondiente.

##### **6.2.3.4.3.2 Prueba Preliminar**

Es conveniente familiarizarse con el termómetro del equipo, así como determinar su apreciación. Una vez que se haya alcanzado el equilibrio térmico entre los distintos componentes del sistema, se enciende el agitador, tomando nota cada minuto de la temperatura del agua en la bomba. Esto se hace hasta que la temperatura se estabilice o hasta que los cambios de temperatura se hagan constantes.

##### **6.2.3.4.3.3 Prueba Principal**

Una vez logrado lo anterior, se conectan eléctricamente los electrodos de la bomba, presionando el interruptor correspondiente. En este momento el hilo de hierro se torna incandescente y se funde, formándose óxido de hierro y quemando completamente el combustible. En este momento la temperatura comienza a subir rápidamente. Las lecturas de temperatura siguen tomándose minuto a minuto hasta que se estabilice.

#### 6.2.3.4.3.4 Prueba Complementaria

Si luego de dar por culminada la prueba principal se aprecian algunos nuevos cambios de temperatura, estos se anotan minuto a minuto hasta verificar la estabilidad o hasta que los cambios sean constantes. Si esto no ocurre, la prueba finaliza cuando el número de lecturas sea igual al de la prueba preliminar.

#### Tablas de Datos

	Prueba Preliminar		Prueba Principal	Prueba complementaria			Prueba Preliminar		Prueba Principal	Prueba complementaria	
#	T	$\Delta T$	T	$\Delta T$	T		T	$\Delta T$	T	T	$\Delta T$
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											

**Tabla 6. 3 Toma de datos en Pruebas de calorimetría**

$$\Delta T = \Delta T_{\text{PRUEBA PRINCIPAL}} + C \quad \text{donde} \quad C = m \cdot P_C + \frac{P_P + P_C}{2} \quad (\text{ec. 6.9})$$

$m$  = Número de lecturas  
de la prueba principal

$$P_P = \frac{\text{Suma de diferencias de prueba preliminar}}{\text{Número lecturas de prueba preliminar}} \quad (\text{ec. 6.10})$$

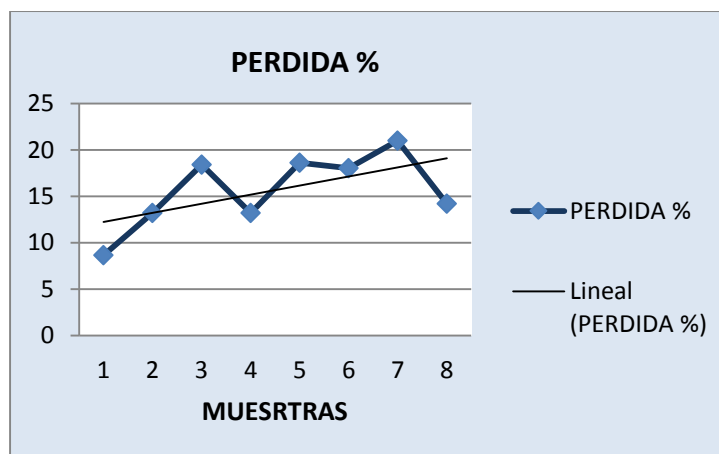
$$P_C = \frac{\text{Suma de diferencias de prueba complementaria}}{\text{Número lecturas de prueba complementaria}} \quad (\text{ec. 6.11})$$



Es importante señalar que el último valor anotado para la prueba preliminar será el primero para la prueba principal y el último anotado para la principal será el primero para la complementaria. Las diferencias se calculan a través de la ecuación  $n-(n+1)$  y se colocan con el signo que resulten, no en valor absoluto.

## VII. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 7.1 Pérdida de humedad en la Compactación



**Gráfico 7. 1 Porcentaje de Pérdida de humedad en compactación**

Se observa que las últimas 4 muestras tienen mayor pérdida de humedad, las cuales tienen una mezcla de 50/50. Es decir, se constata que entre mayor presencia de rumen, mayor porcentaje de humedad.

### 7.2 Cálculo de densidad húmeda

Muestra	Rango de Humedad	Mezcla	Peso (g)	Ancho (cm)	Altura (cm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (cm <sup>3</sup> )
1	De 2 a 5%	50/50	195.50	5.72	6.7	170.59	1.146
2	De 2 a 5%	50/50	185.71	5.72	6.3	161.61	1.149
3	De 10 a 15%	50/50	174.60	5.72	5.8	148.78	1.174
4	De 10 a 15%	50/50	185.70	5.72	6.9	177.00	1.049
5	De 10 a 15%	75/25	174.50	5.72	6.5	167.00	1.045
6	De 2 a 5%	75/25	175.42	5.72	6.5	167.76	1.046
7	De 2 a 5%	75/25	169.05	5.72	6.5	167.51	1.009
8	De 10 a 15%	75/25	163.57	5.72	7.0	180.59	0.906

**Tabla 7. 1 Densidad Húmeda. Antes de pasar al secado.**

Se pudo determinar que en promedio la densidad de las briquetas húmedas fue de 1.065 g/cm<sup>3</sup>.

### 7.3 Cálculo de densidad seca

Muestra	Peso(g)	Ancho(cm)	Altura(cm)	Volumen	Densidad g/cm <sup>3</sup>
1	63,83	5,72	6,8	174,43	0,366
2	65,60	5,72	6,3	161,61	0,406
3	69,67	5,72	5,9	151,35	0,460
4	80,48	5,72	6,9	177,00	0,455
5	66,37	5,72	6,6	169,56	0,391
6	58,70	5,72	6,5	167,76	0,350
7	55,69	5,72	6,5	167,51	0,332
8	66,72	5,72	7,0	180,59	0,369

**Tabla 7. 2 Densidad después de Proceso de Secado**

En promedio la densidad de las briquetas secas fue de 0.391 g/cm<sup>3</sup>, el cuales casi un tercio de la densidad húmeda como resultado de la gran pérdida de peso durante el secado

### 7.4 Cálculo de la Variación d la Densidad

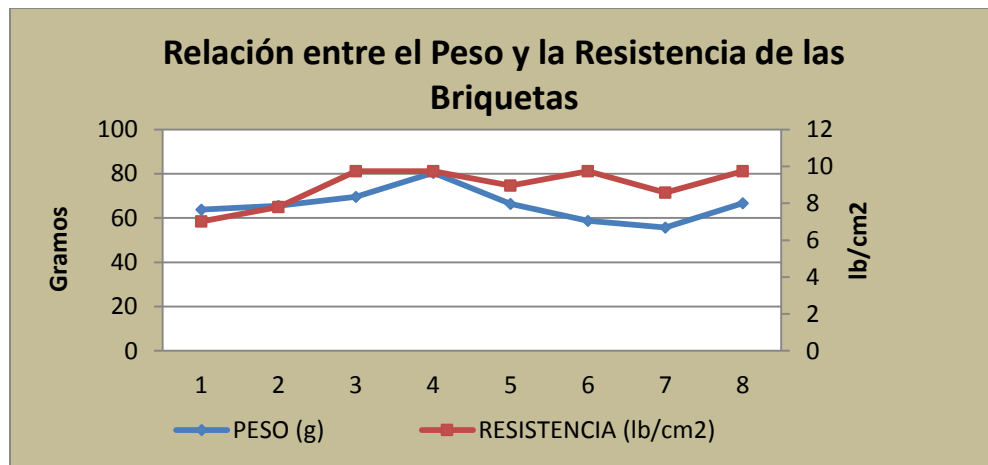
Muestra	Rango de Humedad	Mezcla	Densidad Húmeda g/cm <sup>3</sup>	Densidad Seca g/cm <sup>3</sup>	Δ Densidad (%)
1	De 2 a 5%	50/50	1,146	0,366	146,9
2	De 2 a 5%	50/50	1,149	0,406	154,6
3	De 10 a 15%	50/50	1,174	0,460	164,5
4	De 10 a 15%	50/50	1,049	0,455	176,5
5	De 10 a 15%	75/25	1,045	0,391	159,9
6	De 2 a 5%	75/25	1,046	0,350	150,3
7	De 2 a 5%	75/25	1,009	0,332	149,1%
8	De 10 a 15%	75/25	0,906	0,369	168,9%

**Tabla 7. 3 Variación de densidad de las briquetas**

Debido a las considerables pérdidas de humedad en este proceso la densidad varía en promedio un 158%.

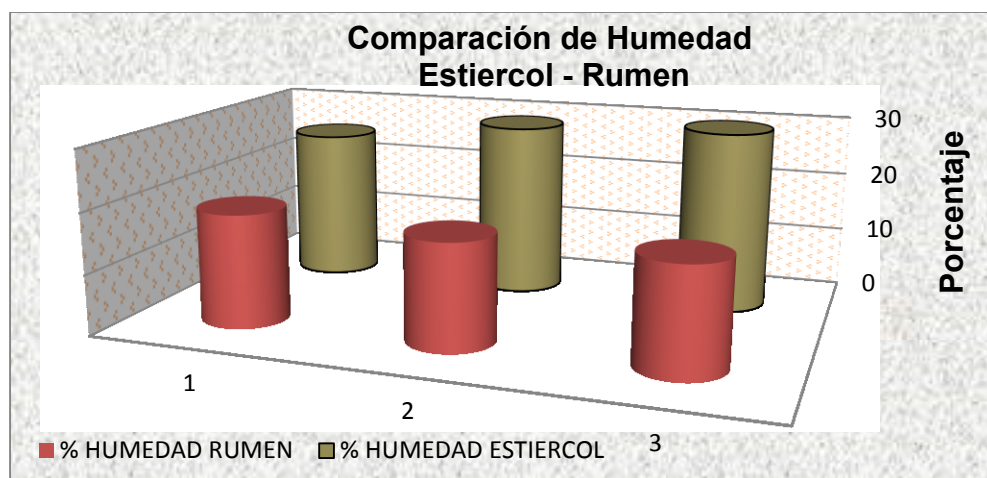
## 7.5 Resultados de Pruebas de Resistencia

En promedio podemos decir que las briquetas con mayor porcentaje de aserrín poseen una mejor resistencia a la compresión, en otras palabras, serían más seguras de manipular. Si se analiza la resistencia desde el punto de vista de la masa de las briquetas, se puede notar que existe una clara relación entre ambas variables.

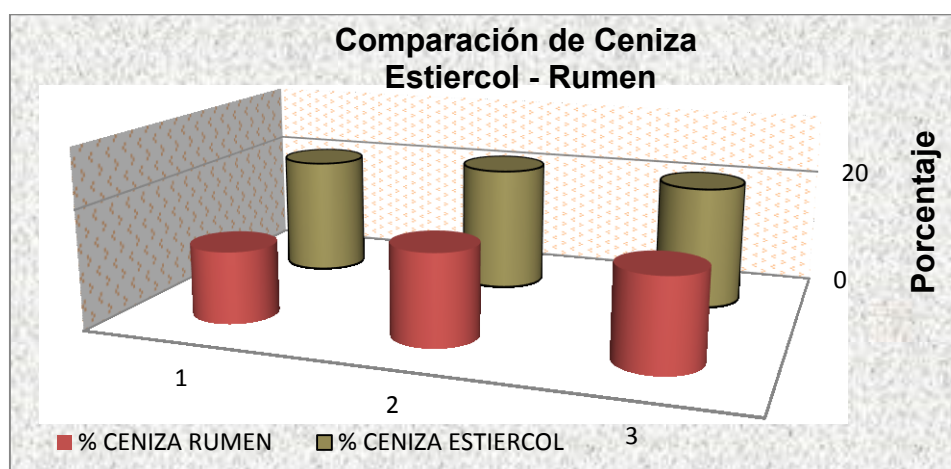


**Gráfico 7. 2 Relación entre Peso y Resistencia de las Briquetas**

## 7.6 Resultados de pruebas comparativas de Humedad y Cenizas entre Rumen y estiércol



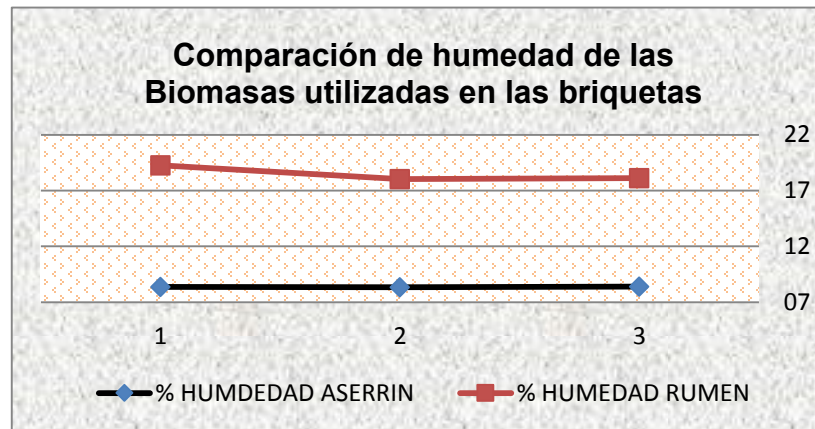
**Gráfico 7. 3** Comparación de Humedad entre Rumen y estiércol.



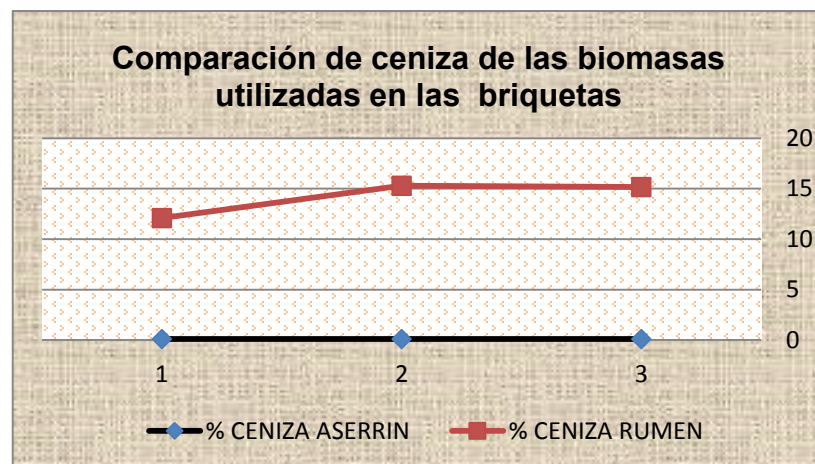
**Gráfico 7. 4** Comparación Porcentaje de ceniza entre Rumen y Estiércol

De los datos arrojados en las pruebas tanto de humedad como de ceniza a los materiales biomásico se determinó que el rumen es mejor material que el estiércol, por tener menores porcentajes de estas propiedades. Este análisis está sustentado por el estudio “UWET Terminología unificada sobre dendroenergía” de la Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO).

## 7.7 Resultados de pruebas comparativas de Humedad y Cenizas entre Rumen Aserrín



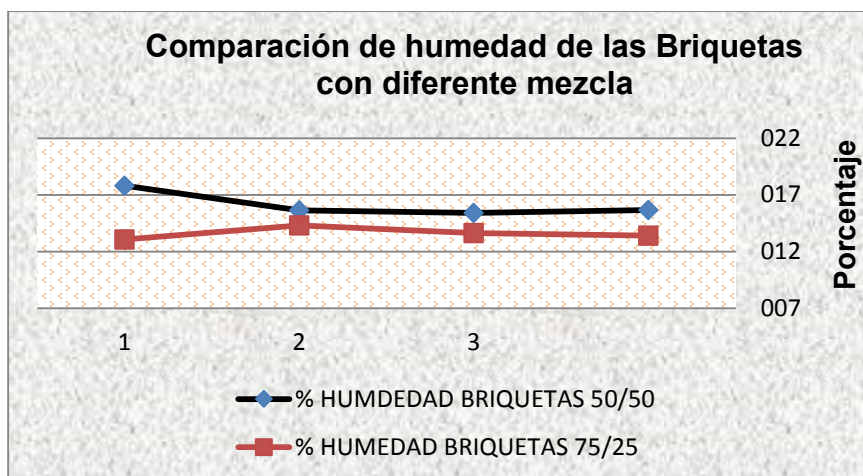
**Gráfico 7. 5 Comparación Porcentaje de humedad entre Rumen y Aserrín**



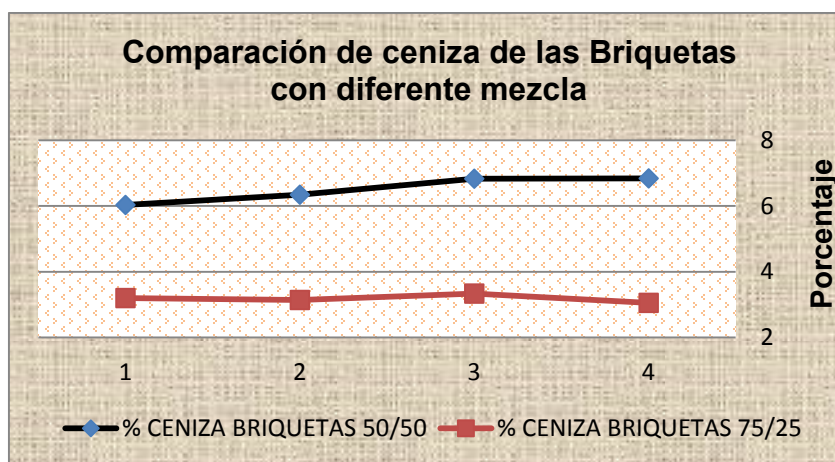
**Gráfico 7. 6 Comparación Porcentaje de Ceniza entre Rumen y Aserrín**

Como se puede observar en ambos gráficos la humedad y porcentajes del Rumen son mayores a los del aserrín, por lo que se puede decir que las briquetas con mayor proporción de aserrín deberían tener mejores propiedades que las demás.

## 7.8 Resultados de Pruebas de las Briquetas



**Gráfico 7. 7 Comparación de la humedad en las briquetas**



**Gráfico 7. 8 Comparación del porcentaje de ceniza en las briquetas**

En las pruebas de laboratorios de humedad y ceniza, realizadas a las briquetas se obtuvieron datos alentadores para la investigación. Los resultado demuestran que las briquetas de composición de mezcla 75/25, aserrín y rumen respectivamente, son mejores tanto de humedad y ceniza. En este caso la humedad es 2% más baja que las briquetas de mezcla 50/50 y en las prueba de ceniza es menos de la mitad que genera una briqueta de mezcla 50/50.

## 7.9 Resultados de pruebas de calorimetría a briquetas

Muestra	Peso (g)	Rango de Humedad	Biodiesel (%)	Mezcla (Aserrín/Rumen)	Poder Calorífico (MJ/Kg)
1	63.829	De 2 a 5%	5%	50/50	16.5050
2	65.599	De 2 a 5%	10%	50/50	15.8750
3	69.670	De 10 a 15%	5%	50/50	17.5750
4	80.484	De 10 a 15%	10%	50/50	16.6920
5	66.367	De 10 a 15%	5%	75/25	17.6170
6	58.695	De 2 a 5%	5%	75/25	17.8390
7	55.695	De 2 a 5%	10%	75/25	18.4320
8	66.721	De 10 a 15%	10%	75/25	18.4260

**Tabla 7. 4 Resultados de pruebas de poder calorífico sobre las 8 muestras**

## 7.10 Propiedades Físicas de los materiales

Materiales	Porcentaje de Humedad	Porcentaje de Cenizas	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Aserrín	7.86	0.09	1.13
Rumen	17.97	14.18	0.7
Biodiesel	2%	-----	0.88

**Tabla 7. 5 Propiedades Físicas de las Materias Primas**

Se analizó en laboratorio las materias primas determinando sus propiedades físicas. El aserrín muestra mejores propiedades que el rumen, los cuales son los principales materiales usados en las briquetas.

## 7.11 Poder Calorífico de las Materias Primas



Materiales	Poder Calorífico
Aserrín	18.68 MJ/Kg
Rumen	16.97 MJ/Kg
Biodiesel	42.3527 MJ/Kg

**Tabla 7. 6 Poder Calorífico de las materias primas**

Estos valores son teóricos ya que por los altos costos de las pruebas de calorimetría solo se logró realizárseles a las briquetas finales.

## 7.12 Propiedades del Combustible

Muestra	Rango de humedad	Biodiesel (%)	Mezcla (Aserrín/Rumen)	Poder Calorífico MJ/Kg
1	De 2 a 5%	5%	50/50	16.5050
2	De 2 a 5%	10%	50/50	15.8750
3	De 10 a 15%	5%	50/50	17.5750
4	De 10 a 15%	10%	50/50	16.6920
5	De 10 a 15%	5%	75/25	17.6170
6	De 2 a 5%	5%	75/25	17.8390
7	De 2 a 5%	10%	75/25	18.4320
8	De 10 a 15%	10%	75/25	18.4260

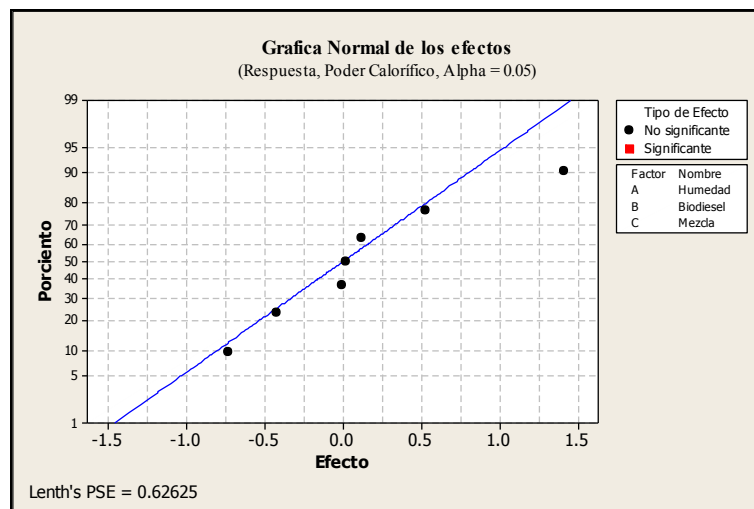
**Tabla 7. 7 Poder Calorífico de las diferentes briquetas**

Muestra	Mezcla (Aserrín/rumen)	Promedio de Humedad	Porcentaje de Cenizas	Densidad Promedio
1	50/50	15.63	6.51	0.42
2	50/50			
3	50/50			
4	50/50			
5	75/25	13.10	3.18	0.36
6	75/25			
7	75/25			
8	75/25			

**Tabla 7. 8 Propiedades Físicas de las diferentes briquetas**

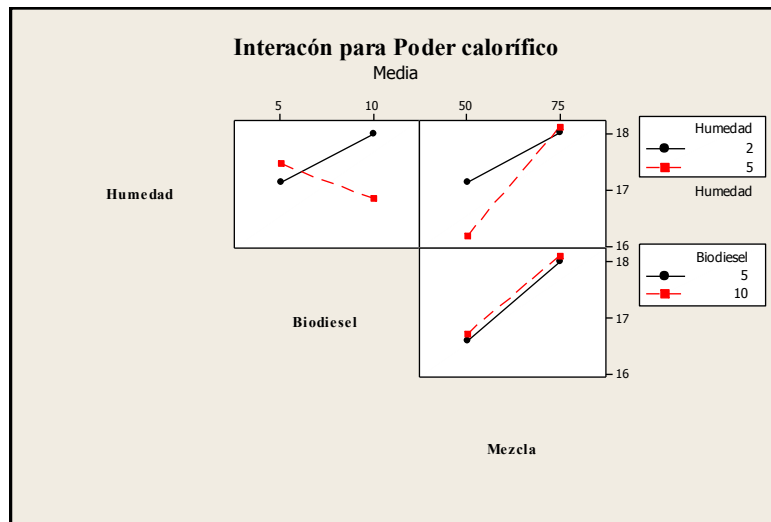
Se determinó las propiedades de las briquetas en sus diferentes mezclas en los cuales las de mezcla 50/50 tienen mayor densidad, sin embargo, las mejores briquetas por su poder calorífico son las que tienen mayor porcentaje de aserrín y humedad controlado en un rango de entre 2 - 5%.

### 7.13 Análisis arrojados por el Minitab



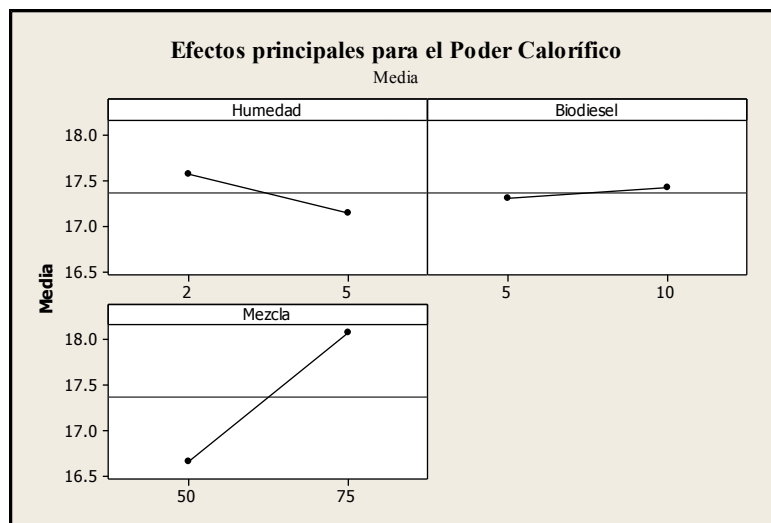
**Ilustración 7. 1 Gráfica normal de los efectos**

Los factores no presentan efectos significativos sobre la variable repuesta.



**Ilustración 7. 2 Iteración para poder calorífico**

Muestra la interacción entre los factores, observándose una mayor interacción humedad biodiesel.



**Ilustración 7. 3 Efectos principales para el poder calorífico**

Se observa que los factores humedad y la mezcla de biomasa muestran mayores efectos sobre la repuesta.

## 7.14 Costos de producción del Combustible Sólido

COSTOS DE PRODUCIR LAS BRIQUETAS						
Tipo	Etap	Descripción	Unid. Medida	Precio/Unid	Cantidad	Total
Fijo	Elaboración de Briqueteadora	Gata Hidráulica 6 Ton	Unid	C\$ 620.00	1	C\$ 620.00
		Tubo 1 1/4" #16	Unid	C\$ 220.00	1	C\$ 220.00
		Lámina galvanizada de 3/8 pulg.	unid	C\$ 350.00	1	C\$ 350.00
		Tubo redondo PVC de 2 pulg.	Unid	C\$ 40.00	1	C\$ 40.00
		Mano de Obra	total	C\$ 700.00	1	C\$ 700.00
		Transporte	Unid	C\$ 200.00	1	C\$ 200.00
		Total Briqueteadora				C\$ 2,130.00
Variable	Producción	Biodiesel	L	30	38	C\$ 1,140.48
		Almidón	Lb	C\$ 20.00	220	C\$ 4,400.00
Fijo		Mano de Obra	Unid	3484	1	C\$ 3,484.00
		Costo Total de Producción				C\$ 9,024.48
		Costo por Unidad				C\$ 1.78

**Tabla 7. 9 Costos de Producir el combustible sólido**

El costo por unidad puede variar en dependencia de la inversión que se pueda hacer para equipo que mejore el proceso de mezcla o ajustes posibles a la briqueteadora ya que esta fue construida como parte de nuestro proceso investigativo y la mezcla se realizó de manera manual. De otra manera podrían elaborarse más briquetas por día, reduciendo así su costo unitario. En las condiciones actuales, se estima que puedan producirse unas 231 briquetas por día o 5082 por mes.

## VIII. CONCLUSIONES

- El aserrín posee una humedad de 7.86% y 0.09 % de cenizas, mientras que el rumen posee un 17.97 % de humedad y un 14.18 % de cenizas, siendo el aserrín mejor material de combustión. Además el aserrín tiene una densidad de 1.13 g/cm<sup>3</sup> mientras el rumen solo posee a 0.7 g/cm<sup>3</sup>.
- Se consiguió un poder calorífico de 18.43 MJ/Kg en las briquetas con mezcla de 75/25 con alrededor de un 5% de humedad y un 10% de biodiesel, siendo esta la mejor de todas.
- Los costos por unidad de producir las briquetas en C\$ 1.78, considerando el aserrín y estiércol como materiales sin costos ya que estos son residuos propios del INFIL y Nuevo Carnic.

## IX. RECOMENDACIONES

- Se recomienda la fabricación de briquetas con mayor porcentaje de aserrín, o podría incluso utilizarse exclusivamente aserrín en lugar de la mezcla.
- Se propone secar las briquetas a intemperie ya que, aunque las briquetas que obtuvieron mayor poder calorífico fueron tratadas en desecador para reducir el contenido de humedad, las que no pasaron por este proceso mostraron un poder calorífico alto y agregar un proceso de secado en horno aumentaría mucho los costos de producción.
- Se exhorta a triturar los materiales antes de la mezcla para mejorar la resistencia y densidad de las briquetas.
- Se sugiere realizar ajustes al diseño de la briqueteadora para facilitar la introducción de los materiales a los moldes de las briquetas, pudiéndosele adaptar una especie de tolva y ubicarse más moldes para elaborar más briquetas en cada compactación.
- Se recomienda realizar las pruebas calorimétricas a los materiales utilizados, para corroborar con los datos teóricos encontrados. Estas no pudieron realizarse por el alto costo y solo logró hacerseles a las briquetas.

## X. Bibliografía

Álvarez, L. C. (2012, Agosto). *Practica no. 2 bomba calorimétrica*. Recuperado el 11 de octubre de 2012, de [es.scribd.com/doc/102620884/bomba-calorimétrica](http://es.scribd.com/doc/102620884/bomba-calorimétrica).

Cándano, C.F., Coro, R., Frenández, L., García, J.M., Hernández, E.M., Relova, I. (s.f). *Potencial de aserrín de la industria del aserrado de pinus caribaea var. caribaea con fines energéticos*. Recuperado el 15 de septiembre de 2012, de [www.ciget.pinar.cu/Revista/No.2000-1/potencial%20aserrin.htm](http://www.ciget.pinar.cu/Revista/No.2000-1/potencial%20aserrin.htm).

Garrama, L.H. *Fabricación y evaluación de eficiencia y emisiones de briquetas a base de residuos agrícolas como alternativa energética al uso de leña*. Tesis de grado obtenido no publicada, Zamorano. Honduras.

J. Ignacio .C. (s.f). *Propiedades y características de combustibles diésel y biodiésel*. Recuperados el 10 de septiembre de 2012, de [www.wearcheckiberica.es/documentacion/doctecnica/combustibles.pdf](http://www.wearcheckiberica.es/documentacion/doctecnica/combustibles.pdf)

Meelrios. (2010, Agosto). *Biomasa*. Recuperado el 02 de Noviembre de 2012 2010, de [www.buenastareas.com/ensayos/Biomasa/600125.html](http://www.buenastareas.com/ensayos/Biomasa/600125.html).

Metrogas, (s.f.) *Contaminación por uso de combustibles* Recuperado el 10 de octubre del 2012, de [www.metrogas.cl/industria/asesoria\\_ambiental\\_1](http://www.metrogas.cl/industria/asesoria_ambiental_1).

(Ministerio de Industria, energía y turismo [MINETUR] ,1981). Reglamentación relativa a instrucciones técnicas complementarias: “*ITC-MIE-AP01. Instrucción Técnica Complementaria MIE-AP1, relativa a calderas, economizadores, precalentadores, sobrecalentadores y recalentadores*”. España.

Moriel. (2004, Abril). *Combustibles*. Recuperado el 4 oct 2012, de [es.wikipedia.org/wiki/Combustible](http://es.wikipedia.org/wiki/Combustible).

Oficina regional para centro américa de BiomassUsers Network [BUN-CA], (2002). “Manuales sobre energía renovable: Biomasa”. Costa Rica.

Ramírez. (s.f). Fuentes energéticas renovables o alternativas. Recuperado el 11 de septiembre de 2012, de [www.rincondelvago.com/biomasa\\_5.html](http://www.rincondelvago.com/biomasa_5.html).

Triku. (2004, Julio). Poder calorífico. Recuperado el 2 oct 2012, de [http://es.wikipedia.org/wiki/Poder\\_calor%C3%ADfico](http://es.wikipedia.org/wiki/Poder_calor%C3%ADfico).

## **XI. GLOSARIO**

**Rumen:** Rumiante es un animal que digiere alimentos en dos etapas: primero los consume y luego realiza la rumia. Ésta consiste en regurgitación de material

semidigerido, remasticación (que lo desmenuza) y agregación de saliva. Rumiantes son los bovinos, ovinos, caprinos y cérvidos. Los camélidos no están en esta categoría, pues carecen de las características de los verdaderos rumiantes: pre estómago glandular, cuernos, etcétera.

**Capilar:** Se refiere a la estructura que tienen los tejidos de la madera. La madera tiene una gran superficie interna con intersticios o grietas intermicelares que constituyen un sistema capilar microscópico.

**Micelar:** Se refiere a la estructura que tienen los tejidos de la madera. Esta estructura está formada por largas cadenas de celulosa que pasan por zonas cristalinas, es decir, ordenadas, y otras para cristalinas o amorfas, dando lugar a una retícula o disposición en red cristalina con dos tipos de espacios huecos.

**Biocarburante:** Un biocarburante o biocombustible es una mezcla de hidrocarburos que se utiliza como combustible en los motores de combustión interna. Deriva de la biomasa, materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.

**Crisol:** El crisol es un aparato que normalmente está hecho de grafito con cierto contenido de arcilla y que puede soportar elementos a altas temperaturas. También se le denomina así a un recipiente de laboratorio resistente al fuego y utilizado para fundir sustancias. Es utilizado en los análisis gravimétricos.

**Adiabática:** Un proceso o un sistema se dicen adiabáticos, si no hay intercambio de energía con los alrededores, o sea, no hay pérdida de energía. Entonces la energía inicial es igual a la energía final.

**Identación:** Se denomina dureza Brinell a la medición de la dureza de un material mediante el método de indentación, midiendo la penetración de un objeto en el material a estudiar. Fue propuesto por el ingeniero sueco Johan August Brinell en 1900, siendo el método de dureza más antiguo.



**Comburente:** Es cualquier sustancia que en ciertas condiciones de temperatura y presión puede combinarse con un combustible, provocando la combustión. Se encuentra normalmente en el aire con una concentración porcentual en volumen aproximada del 21%. Todos los comburentes tienen en su composición oxígeno disponible, ya sea en forma de oxígeno molecular, como se ha dicho, o bien como oxígeno que ceden al momento de la combustión.

**Combustión directa:** Consiste en la obtención de energía mediante la combustión de la biomasa, principalmente derivado de la madera. Es el proceso más utilizado y antiguo para generación de energía con biomasa, a la vez que es el método más económico, en caso de generación de energía térmica, pues sólo requiere de una fuente para la obtención de biomasa y una caldera para la combustión.

**Pirolisis:** Es la descomposición química de materia orgánica y todo tipo de materiales, excepto metales y vidrios, causada por el calentamiento en ausencia de oxígeno. En este caso, no produce ni dioxinas ni furanos. En la actualidad hay una tecnología muy eficiente en Inglaterra que puede tratar todo tipo de residuos.

**Gasificación:** La gasificación es un proceso termoquímico en el que un sustrato carbonoso (carbón, biomasa, plástico) es transformado en un gas combustible mediante una serie de reacciones que ocurren en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno, vapor de agua o hidrógeno).

**Catalizadores:** Un catalizador propiamente dicho es una sustancia que está presente en una reacción química en contacto físico con los reactivos, y acelera, induce o propicia dicha reacción sin actuar en la misma.

**Proceso anaerobio:** El proceso anaerobio busca depurar la materia orgánica y las aguas residuales, mediante procesos de transformación en ausencia de oxígeno, produciendo biogás.

El biogás obtenido posee un alto contenido en metano, y puede ser usado para la producción de energía.

**Densificación:**Proceso utilizado para incrementar el peso específico (densidad en unidades métricas) de materias residuales para que puedan ser almacenadas y transportadas más eficazmente.

**Desnitrificación:** El proceso de reducción de nitratos hasta nitrógeno gas ocurre en etapas sucesivas, catalizadas por sistemas enzimáticos diferentes, apareciendo como productos intermedios nitritos, óxido nítrico y óxido nitroso.

## **XII. ANEXOS**

### **12.1 Poderes caloríficos de algunos combustibles comunes**

Combustible	Poder calorífico (Kcal/Kg)
Estiércol de vacuno	4.054
Paja de trigo	4.657
Madera seca	4.793
Corteza de pino	5.204
Carbón	7.4
Neumáticos (promedio)	8.3
Petróleo	10.409

**Tabla 12. 1 Poderes caloríficos de diferentes combustibles**

## 12.2 Pérdida de Humedad en la Compactación

Muestra	Mezcla (Aserrín/Rumen)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Diferencia (g)	Pérdida (%)
1	75/25	214.00	195.50	18.50	8.64
2	75/25	214.00	185.71	28.29	13.22
3	75/25	214.00	174.60	39.40	18.41
4	75/25	214.00	185.70	28.30	13.22
5	50/50	214.00	174.15	39.85	18.62
6	50/50	214.00	175.42	38.58	18.03
7	50/50	214.00	169.05	44.95	21.00
8	50/50	214.00	183.57	30.43	14.22

**Tabla 12. 2 Porcentaje de humedad perdido durante la Compactación**

## 12.3 Pruebas de Resistencia en las Briquetas

En la tabla 8 se muestran los datos de las pruebas de resistencia aplicadas a las briquetas y los valores promedios según la proporción de la mezcla.

Mezcla	Muestra	Peso(g)	Área (cm <sup>2</sup> )	Presión (lb)	Resistencia (lb/cm <sup>2</sup> )	Promedio(lb/cm <sup>2</sup> )
--------	---------	---------	-------------------------	--------------	-----------------------------------	-------------------------------

50/50	1	63,828	25,65	180,0	7,017	8,58
	2	65,598	25,65	200,0	7,797	
	3	69,669	25,65	250,0	9,746	
	4	80,484	25,65	250,0	9,746	
75/25	5	66,366	25,65	230,0	8,966	9,26
	6	58,695	25,65	250,0	9,746	
	7	55,694	25,65	220,0	8,576	
	8	66,721	25,65	250,0	9,746	

**Tabla 12. 3 Datos de pruebas de Resistencia en las Briquetas**

## 12.4 Resultados de las pruebas comparativas entre estiércol, rumen y aserrín

HUMEDAD						
ESTIERCOL						
Ítem	Capsula	Masa	Capsula +Masa	Después del Calentamiento	Muestra después de calentar	Humedad %
1	116.8146	11.523	128.3373	125.4154	8.6008	25.36
2	117.9377	10.209	128.1462	125.1989	7.2612	28.87
3	108.8863	10.211	119.097	115.9944	7.1081	30.39
					PROMEDIO	28.20

**Tabla 12. 4 Pruebas de Humedad en Estiércol**

CENIZAS						
ESTIERCOL						
Ítem	Capsula	Masa	Capsula +Masa	Después del Calentamiento	Muestra después de Calentar	Ceniza %

1	116.8146	11.52	128.3373	119.1385	2.3239	20.17
2	117.9377	10.21	128.1462	120.0951	2.1574	21.13
3	108.8863	10.21	119.097	110.9826	2.0963	20.53
					<b>PROMEDIO</b>	<b>20.61</b>

**Tabla 12. 5 Pruebas de Ceniza en Estiércol**

<b>HUMEDAD</b>						
<b>RUMEN</b>						
<b>Ítem</b>	<b>Capsula</b>	<b>Masa</b>	<b>Capsula +Masa</b>	<b>Después Del Calentamiento</b>	<b>Muestra después de Calentar</b>	<b>Humedad %</b>
1	27.2484	4.5387	31.7871	30.9356	3.6872	18.76
2	28.2179	4.2653	32.4832	31.7351	3.5172	17.54
3	36.7514	4.4496	41.201	40.4176	3.6662	17.61
					<b>PROMEDIO</b>	<b>17.97</b>

**Tabla 12. 6 Pruebas de Humedad en Rumen**

<b>CENIZAS</b>
<b>RUMEN</b>

Ítem	Capsula	Masa	Capsula +Masa	Después Del Calentamiento	Muestra después De Calentar	Ceniza %
1	27.2484	3.6872	30.9356	27.6943	0.4459	12.09
2	28.2179	3.5172	31.7351	28.7555	0.5376	15.28
3	36.7514	3.6662	40.4176	37.3074	0.556	15.17
					<b>PROMEDIO</b>	<b>14.18</b>

Tabla 12. 7 Pruebas de Cenizas en Rumen

<b>HUMEDAD</b>						
<b>ASERRÍN</b>						
Ítem	Capsula	Masa	Capsula +Masa	Después del Calentamiento	Muestra después de Calentar	Humedad %
1	110,5951	10,0466	120,6417	119,8523	9,2572	7,86
2	115,6898	10,6484	126,3382	125,5027	9,8129	7,85
3	120,1007	9,8936	129,9943	129,214	9,1133	7,89
					<b>PROMEDIO</b>	<b>7,86</b>

Tabla 12. 8 Pruebas de Humedad en Aserrín

<b>CENIZA</b>						
<b>ASERRIN</b>						
Ítem	Capsula	Masa	Capsula +Masa	Después Del Calentamiento	Muestra después de Calentar	Ceniza %
1	110.5951	10.05	120.6417	110.604	0.0089	0.09
2	115.6898	10.65	126.3382	115.7013	0.0115	0.11
3	120.1007	9.894	129.9943	120.1094	0.0087	0.09
					<b>PROMEDIO</b>	<b>0.09</b>

Tabla 12. 9 Pruebas de Ceniza en Aserrín

## 12.5 Propiedades de Humedad y Cenizas en las briquetas según su proporción de la mezcla

PORCENTAJE DE HUMEDAD						
BRIQUETAS 50/50						
Ítem	Capsula	Masa	Capsula +Masa	Después del Calentamiento	Muestra después de Calentar	Humedad %
1	113.433	73.158	186.591	173.9332	60.5006	17.30
2	108.838	69.465	178.303	167.8001	58.9624	15.12
3	90.4932	63.744	154.237	144.7289	54.2357	14.92
4	95.3685	66.922	162.291	152.1384	56.7699	15.17
					PROMEDIO	15.63
BRIQUETAS 75/25						
Ítem	Capsula	Masa	Capsula +Masa	Después del Calentamiento	Muestra después de Calentar	Humedad %
5	115.411	72.334	187.745	178.6594	63.2481	12.56
6	92.74	70.395	163.135	153.4182	60.6782	13.80
7	36.4546	69.983	106.437	97.2483	60.7937	13.13
8	29.7661	69.315	99.0808	90.1398	60.3737	12.90
					PROMEDIO	13.10
PORCENTAJE DE CENIZA						
BRIQUETAS 50/50						
Ítem	Capsula	Masa	Capsula +Masa	Después del Calentamiento	Muestra después de Calentar	Ceniza %
1	113.432	60.500	173.933	117.080	3.6479	6.03
2	108.837	58.962	167.800	112.577	3.7396	6.34
3	90.493	54.235	144.728	94.196	3.703	6.83
4	95.368	56.769	152.138	99.253	3.8847	6.84
					PROMEDIO	6.51
BRIQUETAS 75/25						
Ítem	Capsula	Masa	Capsula +Masa	Después del Calentamiento	Muestra después de Calentar	Ceniza %
5	115.4113	63.248	178.659	117.4327	2.0214	3.20
6	92.74	60.678	153.418	94.644	1.904	3.14
7	110.7615	60.879	171.641	112.7935	2.032	3.34
8	113.401	60.488	173.889	115.2492	1.8482	3.06
					PROMEDIO	3.18

**Tabla 12. 10 Pruebas de Humedad y Cenizas en las Briquetas**

## **12.6 Materiales Utilizados**

**Ilustración 1. Almidón Preparado**



**Ilustración 2. Mezcla de Aserrín/ Rumen**



**Ilustración 4. Muestras de principales materias**



**Ilustración 3. Mezcla con almidón**



## **12.7 Equipos Utilizados**

**Ilustración 6. Desecador de laboratorios UNI-RUSB**



**Ilustración 5. Balanza analítica de laboratorios UNI-RUSB**





**Ilustración 7. Briqueteadora con sus moldes**



**Ilustración 8. Bomba calorimétrica Mahler- Laboratorio de Biomasa- UNII- RUSB**



## **12.8 Resultados de Procesos**

**Ilustración 10. Pérdida de humedad en la Compactación**



**Ilustración 9. Briqueta recién compactada**



**Ilustración 11. Perforado**



**Ilustración 12. Secado de briquetas a intemperie**



**12.9**

**Resultados de Prueba**

**Ilustración 14. Pruebas de humedad y cenizas sobre las Biomosas**



**Ilustración 13. Pruebas de humedad y cenizas sobre briquetas**



**Ilustración 15. Biodiesel utilizado en las mezclas**



**Ilustración 16. Muestras en desecador**



**Ilustración 17. Máquina universal para pruebas de resistencia de materiales**



## INDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	OBJETIVOS.....	2
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	2
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
III.	ANTECEDENTES.....	3
IV.	JUSTIFICACIÓN .....	4
V.	MARCO TEÓRICO .....	5
5.1	Biomasa.....	5
5.1.1	Consumo de Biomasa como Energía.....	5
5.1.2	Tipos de biomasa .....	6
5.1.3	Biomasa utilizadas para la elaboración de las Briquetas.....	7
5.1.3.1	Madera.....	7
5.1.3.1.1	Aserrín .....	7
5.1.3.1.2	Usos del Aserrín.....	8
5.1.3.2	Biocombustible .....	8
5.1.3.2.1	Biodiesel .....	9
5.1.3.3	Material Ruminal .....	9
5.2	Aglutinantes .....	10
5.3	Combustibles .....	10
5.3.1	Tipos de combustibles .....	10
5.3.2	Composición de los combustibles.....	11
5.4	Características Físicas y Química.....	12
5.4.1	Humedad Relativa (H.R).....	12
5.4.2	Porcentaje de Cenizas .....	13
5.4.3	Poder Calórico .....	14
5.4.3.1	Cálculo de Poder Calórico .....	14
5.4.4	Densidad .....	16
5.4.4.1	Densidad Aparente .....	17
5.4.5	Resistencia .....	17
5.5	Combustión.....	18

5.5.1	Gases de combustión .....	18
5.6	Procesos de Conversión .....	19
5.6.1	Tipos De Conversión de la Biomasa .....	19
5.6.1.1	Conversión Termoquímica .....	19
5.6.1.2	Conversión Bioquímica .....	19
5.6.1.3	Conversión Fisicoquímica (Prensado/Extracción).....	20
5.6.1.4	Descomposición Anaerobia .....	20
5.6.1.5	Aglomeración O Densificación .....	21
5.6.1.5.1	Aspectos Fundamentales en la Densificación .....	21
5.7	Briquetas y sus ventajas.....	24
5.7.1	Usos de las briquetas .....	25
VI.	MATERIAL Y MÉTODOS .....	26
6.1	Materiales y equipos.....	26
6.1.1	Materiales .....	27
6.1.1.1	Agentes Variantes .....	27
6.1.1.2	Agente Constante .....	27
6.1.2	Equipos.....	27
6.1.2.1	Construcción de Briqueteadora .....	28
6.1.2.1.1	Materiales utilizados .....	28
6.1.2.1.2	Diseño de Briqueteadora.....	28
6.2	Metodología.....	29
6.2.1	Diseño de experimento.....	29
6.2.2	Proceso de elaboración de las briquetas .....	30
6.2.2.1	Toma de la Muestra de Biomasa .....	30
6.2.2.2	Medición .....	31
6.2.2.3	Mezcla .....	31
6.2.2.4	Prensado .....	31
6.2.2.5	Secado y perforado .....	32
6.2.2.6	Impregnado.....	32
6.2.3	Elaboración de los cálculos .....	32
6.2.3.1	Análisis Físico de la Biomasa .....	32
6.2.3.2	Variación de humedad en el prensado .....	33

6.2.3.3	Cálculo pérdida de humedad durante el secado .....	34
6.2.3.4	Pruebas de Laboratorio.....	35
6.2.3.4.1	Determinación de la Resistencia a la Compresión .....	35
6.2.3.4.2	Determinación de la Humedad de Aserrín y Rumen.....	35
6.2.3.4.3	Determinación de Ceniza del Aserrín y Rumen.....	36
6.2.3.4.4	Determinación del poder calorífico.....	38
VII.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	41
7.1	Pérdida de humedad en la Compactación.....	41
7.2	Cálculo de densidad húmeda.....	41
7.3	Cálculo de densidad seca .....	42
7.4	Cálculo de la Variación d la Densidad .....	42
7.5	Resultados de Pruebas de Resistencia.....	43
7.6	Resultados de pruebas comparativas de Humedad y Cenizas entre Rumen y estiércol.....	44
7.7	Resultados de pruebas comparativas de Humedad y Cenizas entre Rumen Aserrín.....	45
7.8	Resultados de Pruebas de las Briquetas .....	45
7.9	Resultados de pruebas de calorimetría a briquetas .....	46
7.10	Propiedades Físicas de los materiales.....	47
7.11	Poder Calorífico de las Materias Primas .....	47
7.12	Propiedades del Combustible .....	48
7.13	Análisis arrojados por el Minitab .....	49
7.14	Costos de producción del Combustible Sólido .....	51
VIII.	CONCLUSIONES.....	52
IX.	RECOMENDACIONES.....	53
X.	Bibliografía .....	53
XI.	GLOSARIO.....	54
XII.	ANEXOS .....	57
12.1	Poderes caloríficos de algunos combustibles comunes .....	57
12.2	Pérdida de Humedad en la Compactación.....	58
12.3	Pruebas de Resistencia en las Briquetas.....	58
12.4	Resultados de las pruebas comparativas entre estiércol, rumen y aserrín.....	59

12.5	Propiedades de Humedad y Cenizas en las briquetas según su proporción de la mezcla .....	62
12.6	Materiales Utilizados .....	63
12.7	Equipos Utilizados.....	63
12.8	Resultados de Procesos .....	64
12.9	Resultados de Prueba .....	64

## ÍNDICE DE TABLAS E ILUSTRACIONES

### Marco teórico

Tabla 5. 1 Tipos de Residuos biomásicos .....	7
Tabla 5. 2 Características Físico-Químicas de los Residuos .....	12

### Material y Métodos

Tabla 6. 1 Planteamiento del experimento factorial $2^k$ .....	29
Tabla 6. 2 se presentan los resultados del diseño factorial $2^k$ .....	30
Tabla 6. 3 Toma de datos en Pruebas de calorimetría .....	39

### Análisis de los resultados

Tabla 7. 1 Densidad Húmeda. Antes de pasar al secado. ....	41
Tabla 7. 2 Densidad después de Proceso de Secado .....	42
Tabla 7. 3 Variación de densidad de las briquetas.....	42
Tabla 7. 4 Resultados de pruebas de poder calorífico sobre las 8 muestras.....	47
Tabla 7. 5 Propiedades Físicas de las Materias Primas .....	47
Tabla 7. 6 Poder Calorífico de las materias primas.....	48
Tabla 7. 7 Poder Calorífico de las diferentes briquetas .....	48
Tabla 7. 8 Propiedades Físicas de las diferentes briquetas .....	49
Ilustración 7. 1 Gráfica normal de los efectos .....	49
Ilustración 7. 2 Iteración para poder calorífico.....	50
Ilustración 7. 3 Efectos principales para el poder calorífico .....	50

## **XII. Anexos**

### **Tablas**

Tabla 12. 1 Poderes caloríficos de diferentes combustibles.....	58
Tabla 12. 2 Porcentaje de humedad perdido durante la Compactación.....	58
Tabla 12. 3 Datos de pruebas de Resistencia en las Briquetas.....	59
Tabla 12. 4 Pruebas de Humedad en Estiércol .....	59
Tabla 12. 5 Pruebas de Ceniza en Estiércol.....	60
Tabla 12. 6 Pruebas de Humedad en Rumen.....	60
Tabla 12. 7 Pruebas de Cenizas en Rumen .....	61
Tabla 12. 8 Pruebas de Humedad en Aserrín.....	61
Tabla 12. 9 Pruebas de Ceniza en Aserrín.....	61
Tabla 12. 10 Pruebas de Humedad y Cenizas en las Briquetas.....	63

### **Índice de ilustraciones**

Ilustración 1. Almidón Preparado .....	63
Ilustración 2. Mezcla de Aserrín/ Rumen.....	63
Ilustración 3. Mezcla con almidón .....	63
Ilustración 4. Muestras de principales materias.....	63
Ilustración 5. Balanza analítica de laboratorios UNI-RUSB .....	63
Ilustración 6. Desecador de laboratorios UNI-RUSB.....	63
Ilustración 7. Briqueteadora con sus moldes.....	64
Ilustración 8. Bomba calorimétrica Mahler- Laboratorio de Biomasa- UNII-RUSB .....	64
Ilustración 9. Briqueta recién compactada .....	64
Ilustración 10. Pérdida de humedad en la Compactación .....	64
Ilustración 12. Secado de briquetas a intemperie .....	64
Ilustración 11. Perforado .....	64
Ilustración 13. Pruebas de humedad y cenizas sobre briquetas.....	65
Ilustración 14. Pruebas de humedad y cenizas sobre las Biomosas .....	65
Ilustración 15. Muestras en desecador.....	65
Ilustración 16. Biodiesel utilizado en las mezclas .....	65
Ilustración 17. Máquina universal para pruebas de resistencia de materiales .....	65